

VŠB – TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A INFORMATIKY

DIPLOMOVÁ PRÁCE

2014

Jaroslav Dočkal

VŠB – TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A INFORMATIKY
KATEDRA ELEKTROENERGETIKY

NÁVRH LOKÁLNÍ DISTRIBUČNÍ SÍTĚ NN

**DESIGN OF LV LOCAL DISTRIBUTION
NETWORK**

2014

Jaroslav Dočkal

Zadání diplomové práce

Student:

Bc. Jaroslav Dočkal

Studijní program:

N2649 Elektrotechnika

Studijní obor:

3907T001 Elektroenergetika

Téma:

Návrh lokální distribuční sítě nn.
Design of LV Local Distribution Network.

Zásady pro vypracování:

1. Teoretický rozbor průmyslových a distribučních rozvodů.
2. Popis připojení do sítě ČEZu a kogeneračního zdroje.
3. Analýza stávajících rozvodů.
4. Návrh úprav sítě.
5. Návrhy řešení nových rozvodů.
6. Technickoekonomické zhodnocení.

Seznam doporučené odborné literatury:

1. Hradílek, Z.: Elektroenergetika I a II. Skripta VŠB TU 1992 a 1993
 2. Santarius, P.: Elektrické stanice a vedení. Skripta VŠB TU 1990
 3. Pauza, J.: Zkrat v elektrických rozvodech, SNTL 1970
 4. Krychtálek Z., Pauza J.: Elektrické stanice SNTL 1989
 5. Trojáněk, Z., Hájek J., Kvasnica, P.: Přechodové jevy v el. soustavách, SNTL 1988 Praha
- Normy ČSN, firemní literatura, technická dokumentace


Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Dr. Ing. Jiří Gurecký**


Datum zadání: 01.09.2013

Datum odevzdání: 07.05.2014





prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.
vedoucí katedry

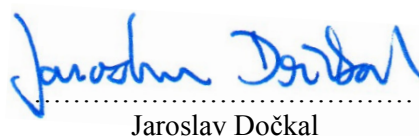


prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Poděkování

Touto cestou děkuji panu doc. Dr. Ing. Jiřímu Gureckému a panu Ing. Lukáši Pracnému za pomoc a rady při vypracování této diplomové práce.

V Ostravě 5. 5. 2014

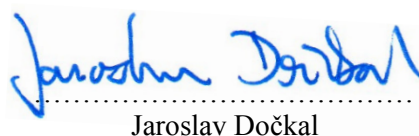


.....
Jaroslav Dočkal

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou/diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě 5. 5. 2014



.....
Jaroslav Dočkal

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá návrhem variant technického řešení lokální distribuční sítě. V teoretické části je rozebírána problematika sítí, podmínky připojení a provozování distribučních sítí a hlediska návrhu elektrického vedení. Teoretická část je dále doplněna rozborem zkratů a stručným úvodem do multikriteriální analýzy.

V praktické části je popsán současný stav a jednotlivé varianty řešení. Pro tyto varianty jsou dále navrhována kabelová vedení. V další části jsou výpočty zkratových proudů a odolnost sítě na jejich účinky. V závěru praktické části jsou všechny tyto varianty zhodnoceny.

KLÍČOVÁ SLOVA

paprsková síť; kabelové vedení; dimenzování vodiče; zkraty; tepelné účinky zkratového proudu; úbytek napětí; ztráty; multikriteriální analýza;

ABSTRACT

This diploma thesis is concerned with design of technical solutions of local distribution network. In the theoretical part examines issues of networks, connections and operation of a distribution network and design aspects of electrical lines. The theoretical part is complemented by the analysis of short circuits and a brief introduction to multi-criteria analysis.

The practical part describes the current state and the individual alternatives. For these variants are designed cable management. In the next section are calculations of short-circuit currents and network resiliency to their effects. In conclusion of the practical part are all these variants evaluated.

KEY WORDS

radial system; underground line; dimensioning of conductor; thermal effects short-circuit current; voltage drop; power losses; multi-criteria analysis;

Seznam použitých symbolů a zkratek

DS	Distribuční soustava
ES	Elektrizační soustava
EZ	Energetický zákon
LDS	Lokální distribuční soustava
NN	Nízké napětí
NT	Nízký tarif
PDS	Provozovatel distribuční soustavy
PPDS	Pravidla provozování distribuční soustavy
PPPS	Pravidla provozování přenosové soustavy
PPS	Provozovatel přenosové soustavy
PS	Přenosová soustava
t	Čas (s)
VN	Vysoké napětí
VT	Vysoký tarif
VVN	Velmi vysoké napětí
ZVN	Zvlášť vysoké napětí
$I_{\check{c}}$	Činná složka proudu (A)
I_J	Jalová složka proudu (A)
I_k''	Počáteční rázový zkratový proud (kA)
R_k	Činný odpor kabelu na jednotku délky ($\Omega \cdot \text{km}^{-1}$)
X_k	Reaktance kabelu na jednotku délky ($\Omega \cdot \text{km}^{-1}$)
ΔU	Úbytek napětí (V)
σ	Proudová hustota ($\text{A} \cdot \text{mm}^{-1}$)
ρ	Měrný elektrický odpor ($\Omega \cdot \text{m}^2 \cdot \text{mm}^{-2}$)

Pokud v tomto seznamu nejsou některé zkratky uvedeny, jsou vysvětleny přímo v textu.

Obsah

ÚVOD.....	11
1. ELEKTRIZAČNÍ SOUSTAVA	12
1.1. Dělení elektrizační soustavy	13
2. ROZDĚLENÍ DISTRIBUČNÍCH SÍTÍ	15
2.1. Venkovní vedení.....	15
2.1.1. Venkovní vedení 110kV.....	15
2.1.2. Venkovní vedení 22kV.....	15
2.1.3. Venkovní vedení 0,4/0,23kV	16
2.2. Kabelová vedení	16
2.2.1. Kabelová vedení 110kV	16
2.2.2. Kabelová vedení 22kV a 0,4/0,23kV	16
2.3. Rozdělení podle typu sítě	17
2.3.1. Sítě paprskové	17
2.3.2. Sítě okružní.....	17
2.3.3. Mřížové sítě	18
3. PŘIPOJOVACÍ PODMÍNKY PRO PŘIPOJENÍ K DISTRIBUČNÍ SÍTI	21
3.1. Základní pojmy.....	21
3.2. Pravidla provozování distribuční soustavy	22
3.3. Povinnosti PDS	22
3.3.1. Charakteristiky napětí elektřiny dodávané z DS ze sítí nn a vn.....	23
3.3.2. Charakteristiky elektřiny dodávané regionálními výrobci	23
3.4. Standardy připojení zařízení k distribuční soustavě	24
3.5. Provedení připojení.....	24
3.5.1. Soustava nízkého napětí	24
3.5.2. Soustava vysokého napětí.....	25
4. HLEDISKA NÁVRHU ELEKTRICKÉHO VEDENÍ	26
5. VÝPOČET ZKRATOVÝCH PROUDŮ	28
5.1. Zkraty	28
5.1.1. Příčiny vzniku zkratu	28
5.1.2. Nebezpečné děje při zkratu	28
5.1.3. Časové průběhy zkratových proudů	30
5.2. Způsob výpočtu zkratových poměrů podle ČSN EN 60909	32
5.2.1. Předpoklady výpočtu	32
5.3. Metoda výpočtu	33
5.3.1. Ekvivalentní napěťový zdroj v místě zkratu	33

5.3.2. Použití souměrných složek.....	33
5.4. Maximální zkratové proudy	35
5.5. Minimální zkratové proudy	36
5.6. Postup výpočtu.....	36
6. MULTIKRITERIÁLNÍ ANALÝZA.....	37
6.1. Teorie multikriteriální analýzy.....	37
6.1.1. Podstata úloh vícekritériálního rozhodování	37
6.1.2. Klasifikace úloh vícekritériálního rozhodování.....	38
6.1.3. Základní pojmy úloh vícekritériálního rozhodování	39
6.2. Obecný postup multikriteriálního hodnocení variant	40
6.2.1. Výběr nejvhodnější varianty.....	41
6.2.2. Vzájemná závislost a podmíněnost kritérií	42
7. ANALÝZA STÁVAJÍCÍCH ROZVODŮ	43
8. VLASTNÍ NÁVRH SÍTĚ.....	45
8.1. Návrh sítě pro jednotlivé varianty.....	45
8.1.1. Varianta 1	46
8.1.2. Varianta 2	50
8.1.3. Varianta 3	51
8.1.4. Varianta 4, 5 a 6.....	53
8.2. Parametry kabelů	58
9. VÝPOČET ZKRATOVÝCH PROUDŮ	59
9.1. Parametry prvků pro výpočet maximálních zkratových proudů.....	59
9.1.1. Výpočet parametrů prvků soustavy společných pro všechny varianty	59
9.1.2. Výpočet parametrů prvků soustavy pro variantu 1 a 2	60
9.1.3. Výpočet parametrů prvků soustavy pro variantu 3.....	60
9.1.4. Výpočet parametrů prvků soustavy pro variantu 4, 5 a 6	60
9.2. Výpočet maximálních zkratových proudů	61
9.2.1. Společné pro všechny varianty.....	61
9.2.2. Pro varianty 1 a 2.....	61
9.2.3. Pro variantu 3	62
9.2.4. Pro variantu 4, 5 a 6.....	63
9.3. Parametry prvků pro výpočet minimálních zkratových proudů	64
9.3.1. Výpočet parametrů prvků soustavy společných pro všechny varianty	65
9.3.2. Výpočet parametrů prvků soustavy pro variantu 1.....	66
9.3.3. Výpočet parametrů prvků soustavy pro variantu 2.....	67
9.3.4. Výpočet parametrů prvků soustavy pro variantu 3.....	67
9.3.5. Výpočet parametrů prvků soustavy pro variantu 4, 5 a 6	68
9.3.6. Shrnutí.....	69
9.4. Výpočet minimálních zkratových proudů.....	69
9.4.1. Varianta 1	69
9.4.2. Varianta 2	72
9.4.3. Varianta 3	73

9.4.4. Varianta 4, 5 a 6.....	74
9.4.5. Shrnutí.....	77
9.5. Výběr ochran.....	78
9.5.1. Varianta 1.....	79
9.5.2. Varianta 2.....	80
9.5.3. Varianta 3.....	81
9.5.4. Varianta 4.....	82
9.5.5. Varianta 5.....	83
9.5.6. Varianta 6.....	83
9.6. Tepelné účinky zkratových proudů.....	84
10. TECHNICKO EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ.....	87
10.1. Vývoj spotřeby a ceny elektrické energie.....	87
10.2. Náklady.....	88
10.2.1. NPV.....	88
10.2.2. Diskontní míra.....	89
10.2.3. Ceny materiálu.....	89
10.2.4. Náklady pro jednotlivé varianty.....	90
10.2.5. Výpočet ztrát.....	91
ZÁVĚR.....	95
LITERATURA.....	96
SEZNAM OBRÁZKŮ.....	97
SEZNAM TABULEK.....	98
SEZNAM PŘÍLOH.....	99

Úvod

V teoretické části je rozebrána problematika sítí, podmínky připojení a provozování distribučních sítí a hlediska návrhu elektrického vedení. Teoretická část je dále doplněna rozbořem zkratů a stručným úvodem do multikriteriální analýzy.

Diplomová práce je rozdělena na část teoretickou a praktickou. Na začátku teoretické části je řešena problematika elektrických sítí. Jsou zde popsány různé druhy sítí a jejich rozdělení. Následně jsou zde nastíněny připojovací podmínky pro připojení k distribuční síti. V další části jsou popsána hlediska návrhu elektrického vedení, výpočet zkratových proudů a popisem jejich účinků. Teoretická část je zakončena stručným úvodem do multikriteriální analýzy, ve kterém je popsán obecný postup vícekritériálního hodnocení variant a nepoužívanější metody MC analýzy.

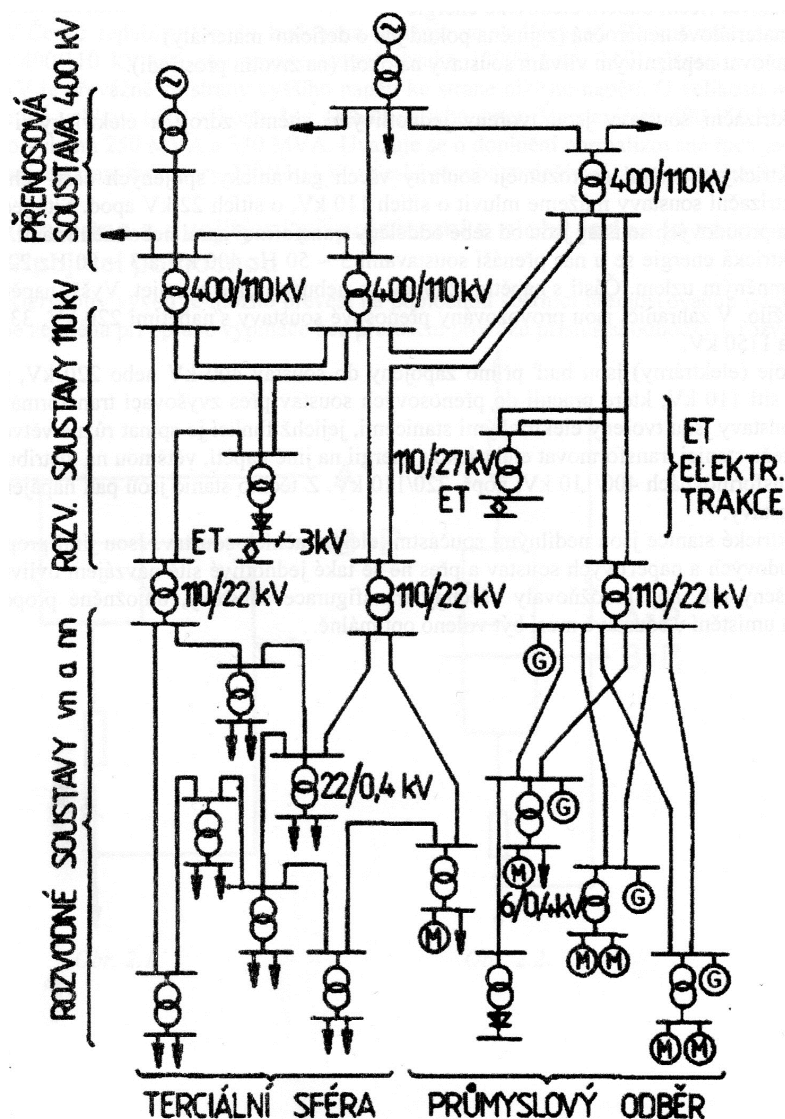
V praktické části je návrh distribuční kabelové sítě, která by měla nahradit stávající připojení k síti distribuční společnosti. Je zde popsán současný stav a jednotlivé varianty řešení. Pro tyto varianty jsou dále navrhována kabelová vedení. V další části jsou výpočty minimálních a maximálních zkratových proudů, návrh jištění a ověření odolnosti sítě na účinky zkratových proudů. V závěru praktické části jsou všechny varianty porovnány a je vybrána neoptimálnější z nich.

1. Elektrizací soustava

Historie přenosu a distribuce elektrické energie začíná v předminulém století. První přenos prakticky využitelného výkonu, který lze srovnat s dnešními představami o přenosu elektrické energie, se uskutečnil v roce 1882 v Německu. Elektrická energie byla přenášena na vzdálenost 57 km prostřednictvím stejnosměrného proudu s účinností kolem 22%. Až vynálezy transformátoru, točivého magnetického pole a asynchronního motoru vytvořily předpoklady k hospodárnému přenosu elektrické energie. V roce 1891 byl uskutečněn první střídavý přenos o délce 175 km s napětím 15kV a výkonem 250kVA.

Počátky elektrifikace českých zemí se datují od roku 1882, kdy bylo uvedeno do provozu elektrické osvětlení v Mahenově divadle za použití stejnosměrného proudu. Na konci 20. let 20. století byl již elektrický proud přístupný 70% obyvatel. Pokračující elektrifikace byla přerušena 2. světovou válkou. Na konci 30. let již bylo elektrifikováno 70% všech obcí, což znamená přibližně 90% obyvatel. Dále docházelo ke zlepšování a zdokonalování přenosu elektrické energie. Po roce 1989 prodělala i česká elektroenergetika zásadní změny. Elektrizací soustava vstoupila jako první hospodářské odvětví ČR do Evropy a v roce 1995 se plně propojila se západoevropskou soustavou.

Elektrizací soustava slouží pro přenos elektrické energie od výrobce až ke konečnému spotřebiteli. Zahrnuje v sobě proces výroby, přenosu, distribuce a spotřeby elektrické energie. Množství vyráběné elektrické energie musí v každém okamžiku odpovídat energii spotřebované. V místě výroby získáváme elektrickou energii přeměnou jiných forem energií v přírodě a v místě spotřeby ji zase přeměňujeme na jiné, námi požadované druhy energie. K výhodám elektrické energie patří její získání z jiných forem energie s poměrně dobrou účinností přeměny a v požadovaném množství, snadná přeměna na jiné druhy energie, snadnou a přesnou měřitelnost dodávaného množství, aj. Samozřejmě má i své nevýhody, mezi které patří například nemožnost její výroby do zásoby a skladování, nákladné zařízení na její výrobu, přenos atd.



Obr. 1: Struktura elektrizační soustavy [2]

1.1. Dělení elektrizační soustavy

Elektrizační soustava se obvykle dělí podle hladiny napětí na přenosové sítě (PS) a distribuční sítě (DS).

Přenosové sítě slouží k přenosu velkých výkonů mezi hlavními uzly elektrizační soustavy. Přenosovou soustavou České republiky vlastní společnost Čeps, a.s. Tuto soustavu tvoří sítě napěťových hladin 400 kV, 220 kV a 110 kV.

Distribuční sítě slouží k napájení oblastí terciální sféry (byty, občanská vybavenost) a jsou z nich napájeny i rozvodné sítě průmyslové, zemědělské a dopravní. Jedná se sítě napěťových hladin, podle normalizované řady, která slouží především k dosažení optimálních podmínek pro zásobování elektrickou energií.

Aby elektrizační soustava mohla plnit úkoly, které pro ni vyplývají z rozvoje hospodářství, musí tato soustava i každá její část nejvhodnějším způsobem plnit tyto požadavky:

- zajišťovat bezpečnost osob
- zajišťovat dostatečnou, spolehlivou a kvalitní dodávku elektrické energie spotřebitelům
- výrazně snižovat pracnost prací v provozu a v údržbě soustavy
- pracovat s vysokou účinností
- pracovat s vyššími parametry a s větším počtem zdrojů a elektrických stanic
- využívat odpadního tepla
- umožňovat řízení odběru elektrické energie
- být materiálově nenáročná (zejména pokud jde o deficitní materiály)
- zabránit nepříznivým vlivům soustavy na okolí (na životní prostředí).

Elektrizační soustavy jsou tvořeny jednotlivými sítěmi, zdroji a elektrickými stanicemi. Elektrickými sítěmi se rozumějí souhrny všech galvanicky spojených částí téhož napětí. V rámci elektrizační soustavy můžeme mluvit o sítích 110 kV, o sítích 22 kV apod. Sítě jednotlivých napěťových a proudových soustav jsou od sebe odděleny transformovnými nebo měnícími.

Elektrická energie se u nás přenáší soustavami 3~50 Hz 400 kV a 3~50 Hz 220 kV, obě s účinně uzemněným uzlem. Vyšší napětí se u nás dosud nepoužilo. V zahraničí jsou provozovány přenosové soustavy s napětími 220 kV, 330 kV, 500 kV, 750 kV a 1150 kV.

Zdroje (elektrárny) jsou buď přímo zapojeny do soustav 400 kV, nebo 220 kV, popř. jsou zapojeny do sítí 110 kV, které pracují do přenosových soustav přes zvyšovací transformátory. Uzly přenosové soustavy jsou tvořeny elektrickými stanicemi, jejichž funkcí je spínat různé větve soustavy a obvykle v téže stanici transformovat elektrickou energii na jiné napětí, většinou na distribuční napětí 110 kV v transformovnách 400/110 kV, popř. 220/110 kV. Z těchto stanic jsou pak napájeny veřejné rozvodné soustavy.

Elektrické stanice jsou nedílnými součástmi elektrizačních soustav. Jsou jimi propojeny sítě různých proudových a napěťových soustav a přes ně se také jednotlivé sítě navzájem ovlivňují. Musí proto být řešeny tak, aby umožňovaly všechny transfigurace soustavy, umožněné propojovanými sítěmi. Jejich umístění v soustavě musí být voleno optimálně.

2. Rozdělení distribučních sítí

Distribuční síť v sobě zahrnují všechna vedení a zařízení, které slouží k zásobování obyvatel a průmyslu elektrickou energií. Tyto sítě zahrnují několik napěťových hladin, podle kterých jsou kladeny různé požadavky na spolehlivost dodávky elektrické energie, a od které se také odvíjí jejich investiční a provozní náklady. Distribuční síť můžeme rozdělit podle několika hledisek jako je například podle uložení vodičů, napětí distribučního vedení, vedení distribuční sítě, nebo podle způsobu zapojení sítě.

Distribuční síť se budují podle účelu buď venkovním vedením, nebo kabelovým vedením, jimiž jsou propojeny jednotlivé transformátory a připojení odběratelé elektrické energie. Jak venkovní, tak i kabelová vedení mají svůj rozsah upotřebení a jejich použití závisí na technických a ekonomických podmínkách způsobu napájení dané oblasti.

2.1. Venkovní vedení

Venkovní vedení se používají tam, kde je především dostatek místa. Proto je nelze použít v oblastech s velkou hustotou zástavby, jako jsou například větší města. Provozní náklady a náklady na údržbu jsou u venkovního vedení vyšší, ale investiční náklady jsou několikanásobně nižší než u kabelových vedení.

2.1.1. Venkovní vedení 110kV

Vedení 110kV tvoří hlavní článek distribuce elektrické energie mezi vazebním bodem nadřazené soustavy a centry odběru průmyslových oblastí nebo měst. Vedení jsou obvykle dvojité pro zajištění dodávky a provozována jako okružní. Pro venkovní vedení se používají holá, kombinovaná AlFe lana umístěná na železných stožárech. V dnešní době se začíná používat nová technologie venkovních vedení 110kV a to pomocí izolovaných vodičů systému PAS 110kV vyráběných například firmou ENSTO.

2.1.2. Venkovní vedení 22kV

Vedení 22kV slouží převážně k rozvodu elektrické energie do obcí a menších měst a také k dodávce elektrické energie středodběratelům. Tyto vedení se provozují jako okružní nebo paprsková. Vedení se umísťuje převážně na betonové sloupy, ale je možné se setkat i s vedením umístěným na dřevěných sloupech. Venkovní vedení 22kV je převážně tvořeno kombinovanými AlFe lany. V současné době se místo kombinovaných lan začínají používat izolované vodiče systému PAS, například vodiče typu SAX-W. I když je cena izolovaných vedení systému PAS vyšší než s holými vodiči, mají izolované vedení řadu předností, pro které se tyto vedení používají. Izolovaná vedení systému PAS podstatně snižují nebezpečí poruch a výpadků dodávky elektrické energie, vzájemná vzdálenost fázových izolovaných vodičů je nižší než u holých vodičů, což umožňuje přivést vysoké napětí i do míst, kde by to s holými vodiči nebylo možné.

2.1.3. Venkovní vedení 0,4/0,23kV

Venkovní vedení 0,4/0,23kV s použitím holých vodičů typu AlFe je možné budovat jen v obcích a malých městech, kde je dostatek místa pro dodržení bezpečných vzdáleností mezi vodiči, a mezi vodiči a zemí. Dnes se již tyto vedení budují nebo rekonstruuji pomocí slanéých izolovaných hliníkových vodičů systému AES. Systém AES lze na rozdíl od holých vedení použít i v místech, kde by to s holými vodiči nebylo možné. Výhodou izolovaných vodičů je jejich větší bezpečnost proti úrazu elektrickým proudem a mají mnohem větší provozní spolehlivost. Venkovní vedení 0,4/0,23kV jsou převážně provozována jako paprsková nebo okružní. Původní venkovní vedení byla umístována na dřevěné sloupy. V dnešní době se používají betonové sloupy, ale začíná se zase uvažovat o dřevěných sloupech s použitím betonových patek.

2.2. Kabelová vedení

Kabelová vedení se používají v místech, kde nelze použít vedení venkovní, což jsou místa s velkou hustotou zástavby a odběrů. Kabelová vedení mají oproti venkovnímu vedení několikanásobně vyšší cenu. Použitím kabelových vedení mizí z komunikací síť sloupů venkovního vedení včetně přípojek pomocí kabelu AYKYz, čímž se podstatně zlepší vzhled obcí nebo měst. Často dochází ke kombinaci venkovního a kabelového vedení, jak na úrovni nízkého napětí, tak i při napájení měst vysokým napětím.

2.2.1. Kabelová vedení 110kV

Kabelová vedení 110kV se budují velmi málo především k jeho značné ceně a jednak pro technickou náročnost při výstavbě i provozu takového vedení. Vedení toho typu najde uplatnění především při zásobování velkých měst a průmyslových komplexů, kde je zapotřebí přivést velké výkony do zastavěných oblastí v centru měst.

2.2.2. Kabelová vedení 22kV a 0,4/0,23kV

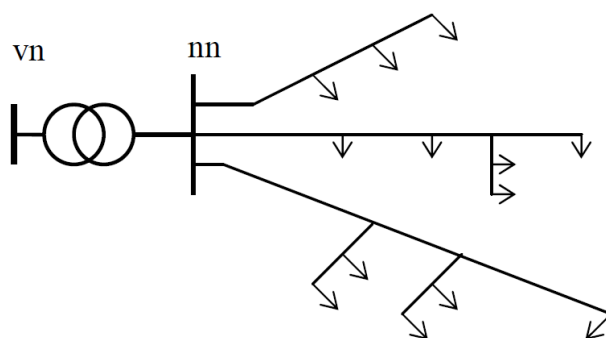
Kabelová vedení vn a nn se stala běžnou součástí systému zásobování větších měst, kde jsou kabely na hlavních trasách měst vedeny především v podzemních kolektorech a uloženy na kabelových lávkách. Ostatní kabelová vedení bývají uložena v zemi s pískovým ložem nebo jinou mechanickou ochranou. Skladba použitých typů kabelů je velice různorodá, protože kompletní výměna kabelů za nové není z ekonomického hlediska možná. Proto se můžeme i v dnešní době ještě setkat s kabely s papírovou a olejovou izolací, nebo s izolací termoplastickou. Dnes se již u kabelů používá polyetylenová izolace s vyšší elektrickou pevností. Kabelová síť vn začíná vývodem z rozvodny vn nebo svodem z venkovního vedení vn a končí v koncové transformační stanici či vývodem na venkovní vedení. Kabelová vedení vn se navrhují a provozují jako paprskové nebo jako okružní s jedním nebo více napájecími vedeními. Kabelová síť nn začíná vývodem z transformační stanice 22/0,4kV a končí v přípojkové skříni odběratele nebo na podpěře venkovního vedení nn ukončením v rozpojovací skříni nebo připojením přímo na vedení. Hlavní kabelová vedení nn se navrhují a provozují převážně jako okružní vedení, rozpojené na jednotlivé paprsky. Ve velkých městech a aglomeracích je kabelová síť mřížová, ale je v normálním provozním stavu většinou provozována jako paprsková nebo okružní.

2.3. Rozdělení podle typu sítě

Distribuční sítě se podle požadované spolehlivosti a kvality dodávky elektrické energie musí vhodně zapojit. Sítě 110kV a 22kV jsou převážně provozovány paprskovým rozvodem, případně průběžným rozvodem. Sítě 400/230V jsou provozovány paprskovým a průběžným rozvodem, husté městské sítě jsou provedeny jako mřížové, i když jsou většinou provozovány paprskově.

2.3.1. Sítě paprskové

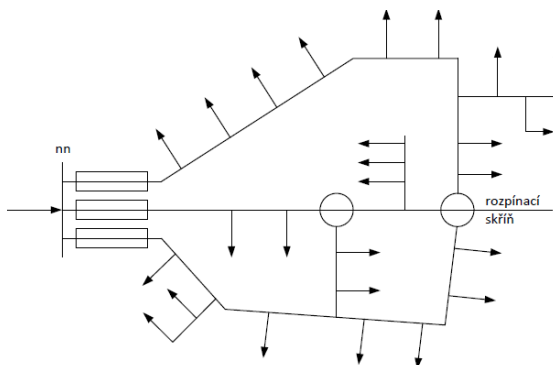
V paprskových sítích vedení vycházejí z napájecího místa (transformovny nebo spínací stanice) a zásobují jednotlivé odběry. Každý vývod (paprsek) je samostatný a nelze je vzájemně spojovat. Tento typ rozvodu se především používá u napětí 110kV a 22kV, a také pro napětí 400/230V v oblastech, kde není nutná velká spolehlivost dodávky elektrické energie. Jelikož přerušení dodávky může být několik hodin nebo i několik dní, používají se paprskové sítě nízkého napětí jen v malých obcích, kde by dlouhodobý výpadek nezpůsobil velké škody.



Obr. 2: Paprsková síť

2.3.2. Sítě okružní

Tento rozvod se používá jak u sítí nízkého napětí, tak u sítí vysokého napětí. Okružní síť je možno provozovat rozepnutou nebo sepnutou. Jednotlivé paprsky nebo polosmyčky jsou vedeny tak, aby se daly sepnout do uzavřených smyček. V obvyklých provozních stavech se tedy jedná o sítě paprskové. Při poruše vedení lze postižený obvod přepnout na sousední vývod, a proto přerušení dodávky elektrické energie trvá vteřiny popřípadě minuty. Z toho důvodu mají okružní sítě větší spolehlivost dodávky elektrické energie než sítě paprskové, ale jsou tím pádem také dražší. Provoz těchto sítí je přehledný a nenáročný. Používají se především k okružnímu napájení větších měst, jejich okolí a u větších obcí.



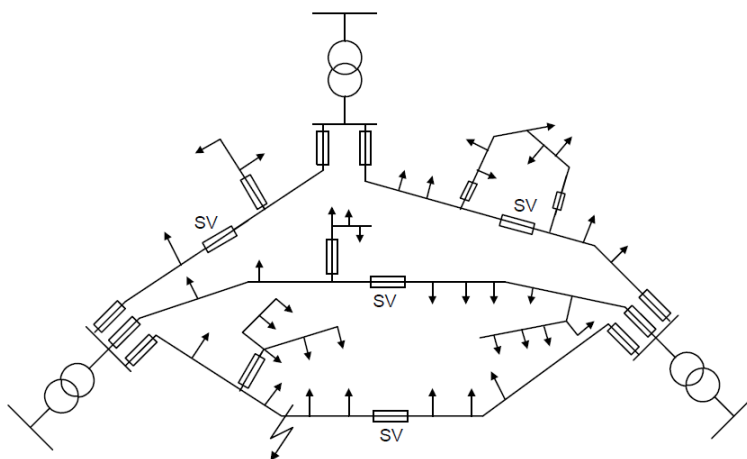
Obr. 3: Okružní síť [1]

2.3.3. Mřížové sítě

Tento typ sítě se převážně používá u sítí nízkého napětí ve větších městech s velkou hustotou zástavby. Provozují se jako kabelová vedení, která jsou spojena na křižovatkách ulic do uzlů. Tyto uzly jsou pojistkové skříně, které jsou většinou umístěné na samostatných pilířích. Pomocí mřížových sítí je zaručena vysoká spolehlivost dodávky elektrické energie, lepší využití transformátorů a vedení. Mřížové sítě mají větší zkratové proudy v sítích nn. Mřížové sítě se budují především v lokalitách s hustotou zatížení 5-8 MVA/km².

Zjednodušená mřížová síť

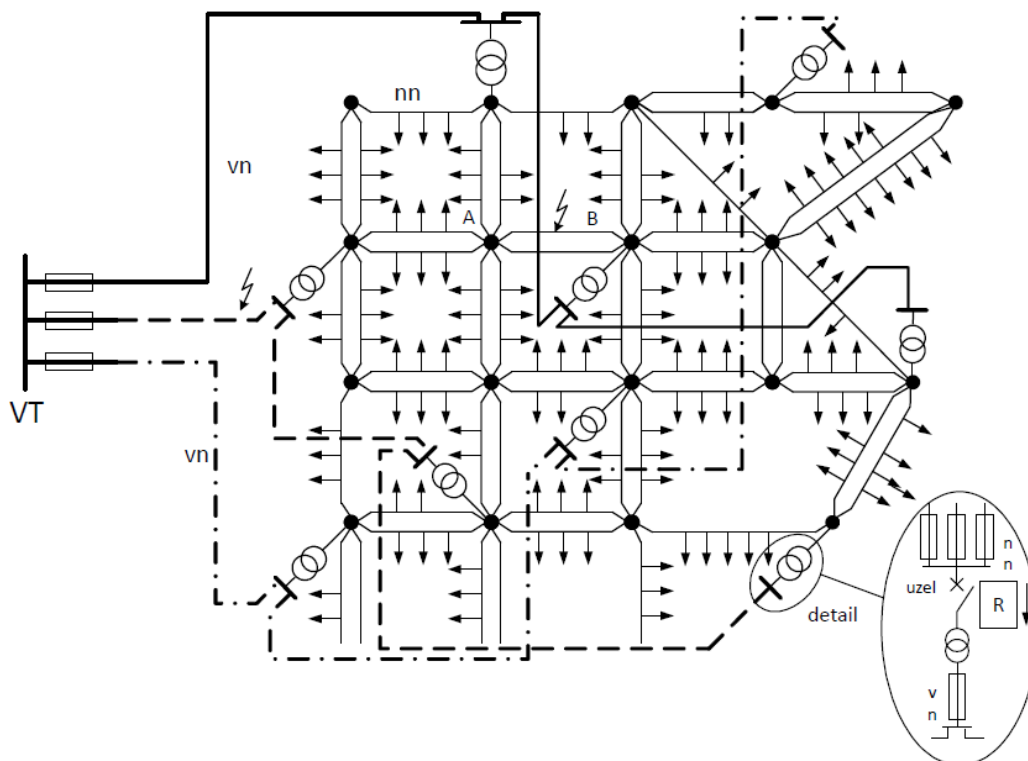
Zjednodušenou mřížovou síť nn lze vytvořit tehdy, pracují-li do společné sítě alespoň dva transformátory vn/nn. Mezi těmito transformátory je spojení hlavními vedeními obvykle s většími průřezy, jištěnými výkonovými (hlavními) pojistkami na vývodech z distribuční trafostanice. Ve vhodných místech těchto hlavních vedení jsou slabší pojistky zvané pojistky slabé vazby (SV). Podle zkušeností i zkoušek v provozu má být poměr jmenovitých proudů pojistek hlavních ku pojistkám slabé vazby 2:1. Vyskytne-li se zkrat v některém místě sítě, reaguje nejprve pojistka slabé vazby, teprve v dalším zlomku sekundy pojistka hlavní. Ostatní síť zůstává v provozu. Zjednodušená mřížová síť reaguje na poruchy na straně nn, nikoliv na straně vn. Distribuční transformovny jsou většinou napájeny jedním vedením vn, obvykle venkovním. [1]



Obr. 4: Zjednodušená mřížová síť [1]

Klasická mřížová síť

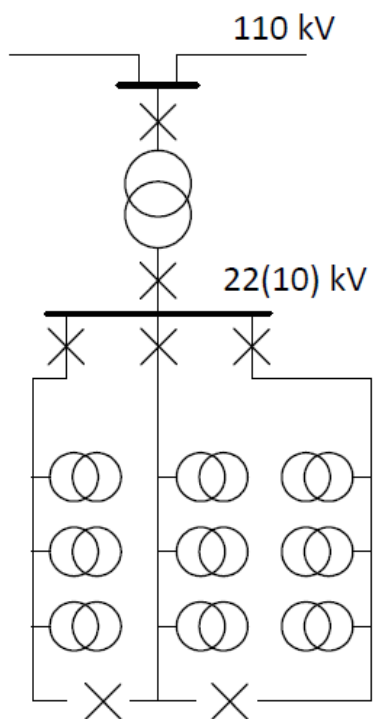
Klasické mřížové sítě nn se zpravidla používají ve větších městech s měrnou hustotou 1 MW/km^2 a více, kde je několik transformoven napájených nejméně dvěma, lépe třemi až pěti napáječi vn. Kabelové vedení nn se spojí na křižovatkách ulic do uzlu. Jsou to skříně s pojistkami za zděné na vhodných místech v domovních zdech nebo umístěné do samostatných pilířů. Pojistky nn mají mít pomalou charakteristiku a ve všech skříních stejnou jmenovitou hodnotu. [1]



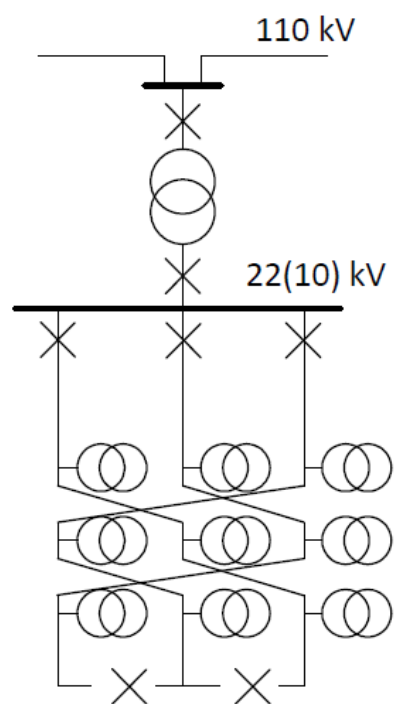
Obr. 5: Klasická mřížová síť [1]

V klasické mřížové síti je vyšší spolehlivost zásobování odběratelů při poruše některého napáječe vn než v ostatních typech sítí. Nastane-li porucha na napáječi vn, teče zkratový proud do místa zkratu nejen z místa napájení VT, ale i ze strany sítě nn. Pro tento případ jsou na straně nn každého transformátoru spínače ovládané směrovými relé, která dají popud k vypnutí vadného napáječe v případě toku výkonu z nn do vn. Téměř současně vypne spínač ve stanici, takže daný napáječ zůstane bez napětí, ale zásobování mřížové sítě zůstane neporušeno. [1]

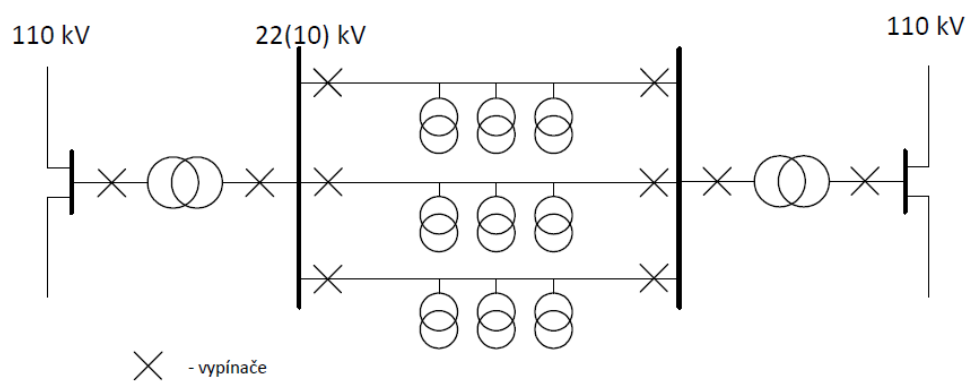
Klasické mřížové sítě dělíme podle počtu transformátorů 110 kV/vn , na které jsou připojeny distribuční transformátory vn/nn napájející mřížovou síť, na jednosystémové (Obr. 5 a 6), dvousystémové (Obr. 7), příp. vicesystémové. Schéma napájení jednosystémové mřížové sítě s prostřídáním napáječi je na Obr. 6. Při poruše jednoho napáječe se tak zatížení rozloží na ostatní napáječe rovnoměrněji. [1]



Obr. 6: Jednosystémová mřížová síť [1]



Obr. 7: Jednosystémová mřížová síť s prostřídánými napaječi [1]



Obr. 8: Dvousystémová mřížová síť [1]

3. Připojovací podmínky pro připojení k distribuční síti

Elektroenergetiku ČR představují tyto hlavní organizace:

Provozovatel přenosové soustavy (PPS) - ČEPS, a.s. (ČEPS), držitel licence na přenos elektřiny

Provozovatelé distribuční soustavy (PDS) - zajišťují spolehlivé provozování, obnovu a rozvoj distribuční soustavy na území vymezeném licencí

- Provozovatel regionální distribuční soustavy distribuční soustava, která je přímo připojena k přenosové soustavě,
- Provozovatel lokální distribuční soustavy (LDS) - distribuční soustava, která není přímo připojena k přenosové soustavě

Držitelé licence na výrobu elektřiny

Držitelé licence na obchod s elektřinou

Zákazníci s vlastní výrobou elektřiny pro krytí své spotřeby.

3.1. Základní pojmy

Přenosová soustava (PS) je vzájemně propojený soubor vedení a zařízení 400 kV, 220 kV a vybraných vedení a zařízení 110 kV, uvedených v příloze PPPS, sloužící pro zajištění přenosu elektřiny pro celé území ČR a propojení s elektrizačními soustavami sousedních států, včetně systémů měřicí, ochranné, řídicí, zabezpečovací, informační a telekomunikační techniky; PS je zřizována a provozována ve veřejném zájmu. [9]

Distribuční soustava (DS) je vzájemně propojený soubor vedení a zařízení 110 kV, s výjimkou vybraných vedení a zařízení o napětí 110 kV, která jsou součástí přenosové soustavy, a vedení a zařízení o napětí 0,4/0,23 kV, 1,5 kV, 3 kV, 6 kV, 10 kV, 22 kV, 25 kV nebo 35 kV, sloužící k zajištění distribuce elektřiny na vymezeném území ČR, včetně systémů měřicí, ochranné, řídicí, zabezpečovací, informační a telekomunikační techniky včetně elektrických přípojek ve vlastnictví PDS; DS je zřizována a provozována ve veřejném zájmu. [9]

Provozovatel DS je fyzická či právnická osoba, která je držitelem licence na distribuci elektřiny; na částech vyjmutých z vymezeného území provozovatele velké regionální DS mohou působit provozovatelé lokálních DS s vlastním vymezeným územím. Provozovatel DS odpovídá za její bezpečný a spolehlivý provoz způsobem přiměřeným ochraně životního prostředí a za její rozvoj. [9]

Provozovatel DS je povinen na vymezeném území na základě uzavřených smluv umožnit distribuci elektřiny, připojit k DS každého a umožnit distribuci elektřiny každému, kdo o to požádá a splňuje podmínky dané EZ, jeho prováděcími vyhláškami a Pravidly provozování DS. Místo a způsob připojení k DS se určí tak, aby nedošlo k přetížení nebo překročení parametrů žádného prvku sítě. [9]

Posláním DS je bezpečně a hospodárně zásobovat odběratele elektřinou v požadovaném množství a kvalitě v daném čase a poskytovat distribuční služby uvnitř i vně soustavy provozovatele DS. Kromě toho zajišťuje systémové a podpůrné služby na úrovni DS. [9]

3.2. Pravidla provozování distribuční soustavy

Pravidla provozování PS definují technické aspekty provozních vztahů mezi provozovatelem PS a všemi dalšími uživateli připojenými k PS. Některá jeho ustanovení se vztahují i na výrobu elektřiny ve výrobnách připojených do DS. [9]

PPDS definují technické aspekty provozních vztahů mezi provozovatelem DS a všemi dalšími uživateli připojenými k DS. Ustanovení PPDS jsou společná a závazná pro všechny provozovatele a uživatele DS. Kromě Pravidel provozování DS musí provozovatelé DS plnit své závazky vyplývající z licence, z obecných právních předpisů a z PPPS. [9]

PPPS a PPDS jsou nezbytná k tomu, aby společně zajistila

- celkově efektivní provoz ES
- přiměřenou prakticky dosažitelnou míru zabezpečení zákazníka elektřinou a kvality dodávek
- průhledná a nediskriminační pravidla přístupu všech uživatelů k sítím.

PPDS se vztahují na:

- provozovatele DS
- provozovatele PS
- provozovatele lokálních DS
- provozovatele výroben připojených do DS
- obchodníky s elektřinou
- zákazníky

Některé části PPDS se vztahují jen na určité kategorie uživatelů DS, a to podle typu připojení nebo charakteru užívání DS. Všichni uživatelé však musí znát a respektovat ta ustanovení pravidel, která se jich týkají. [9]

3.3. Povinnosti PDS

Podle EZ je PDS povinen zajistit, aby DS vyhovovala požadavkům bezpečnosti a spolehlivosti provozu a podmínkám licence kladeným na vlastníka a provozovatele DS. [9]

PDS je povinen udržovat a rozvíjet koncepčně DS (vytvořit a udržovat účinnou, spolehlivou a koordinovanou DS) a zabezpečovat hospodárnou a bezpečnou dodávku elektřiny. [9]

Uživatel DS smí provozovat jen taková zařízení, která vyhovují pro daný účel a prostředí, splňují požadavky na bezpečnost a svými zpětnými vlivy nepřipustně neovlivňují DS a její ostatní uživatele. Zjistí-li PDS narušení bezpečnosti zařízení nebo překročení povolených mezí zpětných vlivů, je uživatel podle EZ povinen realizovat dostupná technická opatření pro nápravu, jinak má PDS právo takovému uživateli omezit nebo přerušit v nezbytném rozsahu dodávku elektřiny, příp. změnit nebo přerušit v nezbytném rozsahu dodávku elektřiny z výroby. [9]

3.3.1. Charakteristiky napětí elektřiny dodávané z DS ze sítí nn a vn

Jednotlivé charakteristiky napětí elektřiny, popisující kvalitu elektřiny dodávané z veřejné distribuční sítě nn a vn podle [PPDS] v platném znění, jsou: [9]

- a) kmitočet sítě
- b) velikost napájecího napětí
- c) odchylky napájecího napětí
- d) rychlé změny napětí
 - velikost rychlých změn napětí
 - míra vjemu flikru
- e) krátkodobé poklesy napájecího napětí
- f) krátkodobá přerušení napájecího napětí
- g) dlouhodobá přerušení napájecího napětí
- h) dočasná přepětí o síťovém kmitočtu mezi živými vodiči a zemí
- i) přechodná přepětí mezi živými vodiči a zemí
- j) nesymetrie napájecího napětí
- k) harmonická napětí
- l) mezipharmonická napětí
- m) úrovně napětí signálů v napájecím napětí.

3.3.2. Charakteristiky elektřiny dodávané regionálními výrobci

Nově připojované zdroje do DS musí být připraveny pro instalaci dálkového ovládání, tzn. ovládací obvod a komunikační cestu mezi elektroměrovým rozváděčem a novým zdrojem.

Připojení k síti PDS se děje ve předávacím místě s oddělovací funkcí, přístupném kdykoliv personálu PDS.

Způsob a místo připojení na síť, stejně jako napětíovou hladinu, konečnou výši rezervovaného výkonu stanoví PDS s přihlédnutím k daným síťovým poměrům, požadovanému výkonu a způsobu provozu vlastní výroby, stejně jako k oprávněným zájmům výrobce. Tím má být zajištěno, že vlastní výroba bude provozována bez rušivých účinků, neohrozí napájení dalších odběratelů nebo dodávky ostatních výrobců. [9]

Posouzení možností připojení z hlediska zpětných vlivů na síť vychází z impedance sítě ve společném napájecím bodě (zkratového výkonu), připojovaného výkonu, stejně jako druhu a způsobu provozu vlastní výroby a údajích o souvisejících výrobnách, včetně jejich vlivu na napětí v DS, s využitím skutečně naměřených hodnot v související oblasti DS. [9]

Výrobu lze připojit:

- a) přímo k DS
- b) v odběrném místě
- c) v předávacím místě jiné výroby

3.4. Standardy připojení zařízení k distribuční soustavě

Připojení žadatele je navrhováno provozovatelem distribuční soustavy tak, aby jeho technické provedení respektovalo plánovaný rozvoj soustavy při současném respektování co nejmenších nákladů na straně žadatele, technických podmínek a působení zpětných vlivů připojení. [9]

Vlastník elektrické přípojky je povinen zajistit její provoz, údržbu a opravy tak, aby se nestala příčinou ohrožení života a zdraví osob či poškození majetku. Ve smyslu EZ může o tuto činnost požádat PDS, který je povinen ji za úplatu vykonávat. [9]

3.5. Provedení připojení

Vlastní provedení připojení je odlišné podle jmenovitého napětí té části distribuční soustavy, ke které bude odběrné zařízení připojeno. [9]

3.5.1. Soustava nízkého napětí

a) provedená venkovním vedením:

- rozšíření venkovního vedení stejným způsobem provedení (holé nebo izolované vodiče, závěsné kabelové vedení)
- přípojkou k DS provedenou závěsným kabelem nebo kabelem v zemi

b) provedená kabelovým vedením:

- zasmyčkování stávajícího kabelového vedení; v tomto případě začíná připojení odběrných zařízení připojením hlavního domovního vedení nebo odbočením k elektroměru z jističích prvků ve skříni v majetku PDS

- rozšíření kabelového vedení stejnou technologií, jakou je provedeno stávající vedení
- přípojkou k DS z kabelové skříně (stávající, upravené stávající nebo nově zřízené) nebo samostatným vývodem z rozváděče nn distribuční transformovny.

3.5.2. Soustava vysokého napětí

a) provedená venkovním vedením:

- úprava vedení provedená stejným způsobem, jako stávající vedení
- přípojkou k DS, odbočující ze stávajícího vedení v místě podpěrného bodu, provedená venkovním vedením nebo kabelovým vedením

b) provedená kabelovým vedením:

- zasmyčkování kabelového vedení; v tomto případě se hranice vlastnictví dohodne individuálně ve smlouvě o připojení
- provedení dvou přívodů z dvou elektrických stanic vn
- jedna přípojka k DS z upravené stávající elektrické stanice vn.

4. Hlediska návrhu elektrického vedení

Připojení odběru na elektrizační soustavu zahrnuje celý soubor potřebných opatření administrativních, technických a technickohospodářských, které je třeba splnit, aby bylo možno dosáhnout co možno nejvyššího stupně efektivnosti v zásobení elektrickou energií. Každý konzum má svoje určitá specifika, která jsou dána nejen velikostí požadovaného výkonu a časovým rozložením odběru, ale i požadavky na kvalitu dodávané elektrické energie. Konkrétně může jít o připojení na existující vedení nízkého napětí (odbočkou) nebo o připojení zvláštním vývodem z příslušné transformovny anebo o přívodní vedení vysokého napětí, popřípadě o potřebu vybudování nové transformovny. Je zde i alternativa velkého odběru, který může vyžadovat přípojku velmi vysokého napětí anebo i vybudování nového vedení od stávajícího energetického uzlu. Přirozeně nelze podat úplný výčet celého postupu řešení, ale je možné uvést hlavní hlediska spojená s návrhem.

Hledisko mechanické pevnosti. Je to především mechanická pevnost, podle které jsou jak u venkovních, tak i u kabelových vedení stanoveny minimální průřezy vodičů, jednak určité směrnice týkající se vlastností vodičů pro dané provozní podmínky. Podle uložení vodičů je možné sem zařadit i otázku izolace vodičů, z které vyplývá i zásadní rozhodnutí mezi venkovním a kabelovým vedením. Toto rozhodnutí je většinou dáno ekonomickým hlediskem, i když např. ve městech se plně uplatňuje i estetické hledisko. U venkovního i kabelového vedení rozeznáváme jednak podmínky při normálním provozu, jednak podmínky při poruchách (při zkratech), kdy jsou jak elektrická zařízení, tak elektrická vedení vystavena zvětšenému mechanickému namáhání.

Hledisko oteplení. Průřez vedení musí být takový, aby proudové zatížení nevyvolalo nedovolené oteplení vodiče se zřetelem na jeho provedení (holý nebo izolovaný vodič) a se zřetelem na prostředí, ve kterém je vodič instalován. I u tohoto hlediska rozeznáváme podmínky normální zatížitelnosti a podmínky při zkratech, kdy je dovoleno, jen ovšem po krátkou dobu, zvýšené oteplení. Zvýšené oteplení vodičů (ale menší než při zkratech) dovoluujeme i při přetížení po dobu asi 1 až 2 h, než se vyčlení vadný úsek a přepne zatížení.

Hledisko úbytku napětí. V užším slova smyslu je toto hledisko velmi důležité pro dimenzování elektrických vedení. Určitý úbytek napětí na napájecím vedení nebo přívodu ke spotřebiči je nezbytným doprovodným jevem zásobení elektrickou energií. Velikost přípustného úbytku napětí je ovšem rozdílná jak v jednotlivých napěťových stupních, tak i při určitém jmenovitém napětí podle druhu, charakteru a důležitosti zásobených spotřebičů. Stanovený úbytek napětí musí přirozeně umožňovat zdárný provoz zásobeného zařízení a být i ve shodě s ostatními hledisky návrhu. Velikost úbytku napětí je úzce spjata s možností regulace napětí, s rozsahem regulace napětí a elektrické vzdálenosti místa odběru od tohoto regulačního zařízení.

K úbytku napětí v užším slova smyslu ΔU přistupuje nutnost respektovat i odchylky napětí δU od jmenovité hodnoty. V širším slova smyslu je otázka úbytku napětí spojena s posouzením celkové kvality dodávky elektrické energie a zahrnuta do tohoto hlediska.

Hledisko hospodárnosti. Zahrnuje především vhodnou volbu proudové soustavy a volbu velikosti napětí pro žádaný přenášený výkon, resp. pro napájení daného spotřebiče.

Dále sem patří stanovení ztrát výkonu nebo naopak určení, resp. kontrola průřezu z přípuštěné ztráty výkonu, rozbor všech činitelů ovlivňujících ztráty ve vedení a opatření na jejich zmenšení (otázky kompenzace jalového výkonu), jakož i otázka kompenzace nesymetrie a omezení výskytů vyšších harmonických.

Otázky hospodárnosti zahrnují v užším slova smyslu výpočet hospodárního průřezu, resp. hospodárné proudové hustoty, jejíž ovšem exaktní uplatnění vyžaduje komplexnější posouzení (jako je otázka volby napětí, počtu transformací a nákladů na primární a sekundární napěťový systém). K tomu je třeba poznamenat, že obecná hlediska nelze často v praxi plně uplatnit vzhledem k tomu, že je třeba vycházet z existujícího stavu přenosu a rozvodu, který sám představuje značné finanční náklady, které ne vždy ještě dosáhly meze technické upotřebitelnosti. Některé otázky hospodárnosti nemohou být řešeny v určité uzavřené samostatnosti, protože se dotýkají problémů celé elektrizační soustavy.

Konečně sem patří celkové posouzení návrhů provedených podle ostatních hledisek z hlediska hospodářského, s uvážením investičních nákladů a nákladů provozních (otázek údržby zařízení), jakož i respektování technického vývoje - posuzování nejen fyzického, ale i morálního zastarávání zařízení s uvážením ovšem i úměrnosti vynaložených nákladů a dosažených cílů pro bezpečný a technicky dokonalý provoz elektrických zařízení.

Hledisko bezpečnosti zařízení a bezpečnosti osob. Zahrnuje především soubor opatření za účelem dosažení zdárného provozu celého zařízení, jakož i jištění zařízení před nadproudy a zkraty. Otázka jištění a odolnosti proti účinkům zkratů úzce souvisí s hlediskem oteplení a s hlediskem mechanické pevnosti vodičů. Dále sem patří ochrany před přepětími, ať již samotného vedení anebo zařízení na ně připojených.

Bezpečnost obsluhujících osob, jakož i všech osob, které mohou přijít s elektrickým zařízením do styku, je hlavním požadavkem na instalaci a provoz elektrických zařízení. Ke každému projektu elektrického zařízení proto patří rovněž návrh ochrany před nebezpečným dotykem, se kterým souvisí i provedení uzemnění v navrhovaném zařízení, resp. napěťovém systému.

5. Výpočet zkratových proudů

5.1. Zkrat

Zkrat je elektromagnetický přechodový děj, definovaný jako náhodné nebo úmyslné spojení dvou nebo více bodů obvodu (vodivé spojení fází, nebo jedné fáze se zemí), které mají při normálním provozu různá napětí, přes poměrně malý odpor nebo impedanci. Způsobuje elektrické poškození dielektrik a izolátorů, tepelná poškození vodičů (tavení) a nakonec i mechanická poškození vlivem zkratových sil. Protože impedance zkratové smyčky je převážně indukční, dochází při zkratu ke zmenšení činného výkonu a tím k odlehčení stroje. Současně klesá napětí. To má za následek zmenšení synchronizačního momentu a ztrátu stability. Zkrat může být způsoben únavou izolace, vlivem počasí, mechanickým poškozením, špatnou manipulací apod.

5.1.1. Příčiny vzniku zkratu

Různé vady zařízení, zejména nedokonalá izolace – a to z výrobních důvodů (materiály, nevhodná technologie výroby atd.), nebo z důvodu špatné montáže (nepředpisové pokládání kabelů, nedodržení technologie při montáži kabelových spojek a koncovek atd.). K tomu přistupují též poruchy z důvodu zhoršení kvality izolace dlouhodobým přetěžováním kabelových vedení - zrychlené stárnutí izolace způsobené zvýšenou teplotou při nadproudech. [1]

Přepětí - atmosférické nebo i provozní způsobí často porušení izolace a následný zkrat. [1]

Cizí zásahy (lidé, přírodní vlivy) - jedná se o velmi častou příčinu vzniku zkratu, např. překopnutí či přetržení kabelu při zemních pracích všeho druhu, dále sesuvy půdy, působení hlodavců na plášť kabelu, pády stromů do venkovního vedení. Do této kategorie je možné zařadit i narušení plášťů kabelů působením bludných proudů. [1]

Nedostatečná zkratová odolnost zařízení - vyskytuje se u starších, nerekonstruovaných zařízení v soustavách s prudkým nárůstem hodnot zkratových proudů. V důsledku částečného poškození zařízení při zkratu dochází pak k následným poruchám. [1]

Vlivem selhání lidského činitele - chybné manipulace v různých (zvláště složitých) elektrických zařízeních, např. vypnutí přípojnicového odpojovače při zatížení (bez vypnutí předřazeného vypínače) v rozvodech vn a vvn. Dále je to ponechání cizích předmětů (zvláště kovových) v zařízení po předchozí demontáži atd. [1]

5.1.2. Nebezpečné děje při zkratu

Zkrat se v elektrickém zařízení projevují četnými nepříznivými následky, které mohou nejen ohrozit bezpečnost provozu, bezpečnost zařízení, ale mohou vážně ohrozit i bezpečnost obsluhujících osob. Elektrické zařízení je proto nutno dimenzovat nejen s ohledem na provozní poměry, ale i na poměry při zkratu, aby následky zkratů byly omezeny jen na neodstranitelné průvodní jevy.

Účinky zkratových proudů jsou: dynamické, tepelné, elektrický oblouk, přepětí, indukovaná napětí, pokles napětí ve zkratovém obvodu a ohrožení stability přenosů elektrické energie.

Dynamické účinky - při zkratu vznikají vlivem elektromagnetického působení zkratového proudu mechanické síly, které způsobují ve formě dynamického rázu těžké mechanické namáhání všech částí elektrického systému. Největší silový ráz je způsoben první amplitudou zkratového proudu, tzv. nárazovým zkratovým proudem I_{km} . Dosahuje takových hodnot, že může vážně ohrozit elektrická zařízení, pokud nejsou dimenzována tak, že těmto silám bezpečně odolávají.

Dynamické síly namáhají vodiče na ohyb, působí na podpěrky a průchodky, namáhají vinutí a jejich upevnění (čela vinutí a póly alternátorů, vinutí silových transformátorů, přístrojových transformátorů proudů, primárních relé, měřicích přístrojů, reaktorů a tlumivek), kabelové armatury a všechny přístroje, které leží ve zkratovém obvodu. U venkovních vedení (především vvn) mohou tyto síly způsobit roztržení podpěrných izolátorů, nebo výkyvy vodičů, kterými se může vzdušná vzdálenost mezi vodiči zmenšit natolik, že mezi nimi dochází k přeskokům. U zařízení, která nejsou dostatečně dimenzována s ohledem na dynamické síly při zkratu, mohou mít tyto síly velmi nepříjemné následky. Ohybem vodičů (např. přípojnic při zkratu na vývodu) může dojít k deformaci vodičů (často trvalé) a jejich vzájemnému dotyku nebo přiblížení natolik, že nastane nový zkrat, který tentokrát vyřadí z provozu celou rozvodnu. Nedostatečně dimenzované podpěrky holých vedení, odpojovačů a jiných přístrojů se vlivem sil ulámou, trhají se vinutí strojů a přístrojů. Dynamické síly mohou také vytrhnout nože odpojovače z kontaktů a vyvolat tak nový obloukový zkrat.

Tepelné účinky zkratového proudu jsou v nedostatečně dimenzovaných zařízeních neméně ničivé. Průchodem zkratového proudu zkratovým obvodem nastává nadměrné oteplení všech částí zkratového obvodu se všemi nepříznivými následky. Během krátké doby trvání zkratu nemůže být toto teplo odvedeno do okolního prostředí a způsobuje velké oteplení. Nastává předčasné stárnutí izolace vodičů, strojů a přístrojů, dochází k vytavení nedokonalých spojů, popraskání podpěrek a průchodek teplem, spálení vinutí strojů a přístrojů a ke spékání kontaktů spínacích přístrojů, hlavně odpojovačů atd. Vlastní vodiče ztrácejí své mechanické vlastnosti nadměrným zahřátím. K častým poruchám dochází i na kabelových koncovkách. [5]

Zatímco u uvedených následků zkratových proudů dochází především k poškození elektrických zařízení, ohrožují zkraty, při nichž se vyvine elektrický oblouk, i obsluhující pracovníky.

Obloukový zkrat se může vytvořit prakticky ve všech případech. V rozvodných zařízeních, kde musíme především počítat s ohrožením bezpečnosti obsluhujících osob, dochází k obloukovému zkratu především chybnou manipulací s odpojovači. Může ovšem nastat i z jiných příčin. Účinky elektrického oblouku jsou způsobovány především jeho zářením a tlakem, vyvolaným energií oblouku a tepelným a světelným zářením. Záření vydávané elektrickým obloukem je ultrafialové, viditelné, infračervené a tepelné. Způsobuje nadměrné zahřátí předmětů v blízkosti elektrického oblouku. Na záření se podílejí i hliníkové páry, proto je záření oblouku mezi hliníkovými elektrodami (vodiči) větší než mezi elektrodami měděnými. Záření velmi ohrožuje obsluhující pracovníky. Nutno uvážit, že ozáření o velikosti 25 W/cm^2 vede k bezpodmínečnému poškození lidské kůže. [5]

Pokles napětí - při zkratu dochází k náhlému poklesu impedance elektrického obvodu a k mimořádnému poklesu napětí, přičemž do místa poruchy tečou zkratové proudy ze všech zdrojů. Úbytky napětí rostou od místa zdrojů k místu zkratu, takže pokles napětí se projeví různou měrou v celé soustavě. Pokles napětí se nepříznivě projeví na funkci řady elektrických spotřebičů,

např. indukčních motorů, kde prudce klesá točivý moment motoru. U světelných spotřebičů dochází ke zmenšení světelného toku (žárovky), popřípadě ke zhasnutí (výbojky, zářivky). Pokles napětí v přenosových soustavách ohrožuje také stabilitu chodu systému. [1]

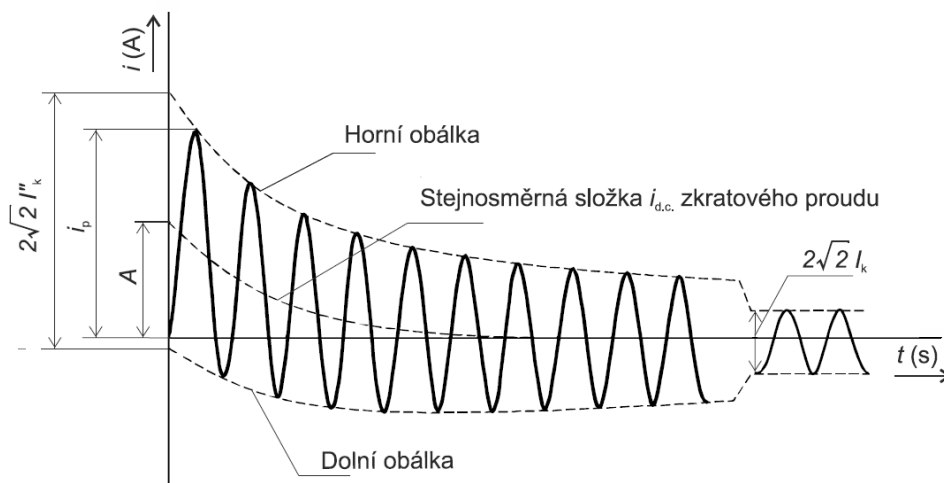
Indukované napětí - zkratové proudy tekoucí silovými vedeními (zemí) ohrožují funkci řady sdělovacích zařízení svým magnetickým polem, a tím i indukovaným napětím na těchto sdělovacích zařízeních. [1]

Přepětí – v souvislosti s vypínáním zkratových proudů vznikají v rozvodech přepětí dosahující hodnoty až dvojnásobku jmenovitého napětí. Vedle toho je třeba věnovat pozornost také velikosti zotaveného napětí po odepnutí zkratu vypínačem. Zotavené napětí může svojí strmostí narušit nejen izolaci elektrického zařízení, ale také vlastní vypínací proces ve vypínači opětným přeskokem vypínací dráhy a opětovným zapálením oblouku mezi kontakty vypínače, což může vést i k havárii vypínače. [1]

Uvedené následky zkratových proudů jsou velmi závažné, obzvláště proto, že se obvykle v praxi projevují současně. Lze je pochopitelně snížit omezením zkratových proudů. Pokud dojde ke zkratu, nelze je vyloučit. Dynamické, tepelné a přepětěvé účinky lze zvládnout dostatečným dimenzováním elektrických zařízení a rozvodu. Vznik elektrického oblouku se může do jisté míry omezit použitím kvalitních a dostatečně dimenzovaných přístrojů. Nelze však vyloučit příčiny, dané hrubým lidským selháním, např. vytažením oblouku ručním vypnutím zatíženého odpojovače, manipulací při odblokovaném stavu, sebevražděnými úmysly apod. Je třeba činit opatření, aby nedošlo k úrazu obsluhujících pracovníků při obloukovém zkratu, hlavně v rozvodných zařízeních.

5.1.3. Časové průběhy zkratových proudů

V důsledku náhlé změny impedance při zkratu probíhá v synchronních strojích a v ostatních prvcích ES přechodný děj. Energie magnetického pole se v těchto prvcích nemůže měnit skokem, a proto má zkratový proud v závislosti na čase neharmonický průběh (Obr. 9). Největší hodnoty dosahuje zkratový proud v prvních okamžicích po vzniku zkratu. S rostoucím časem zkratový proud klesá, až se ustálí na harmonickém průběhu. [1]



Obr. 9: Časový průběh zkratového proudu [6]

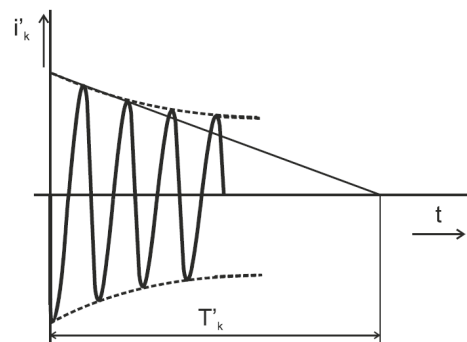
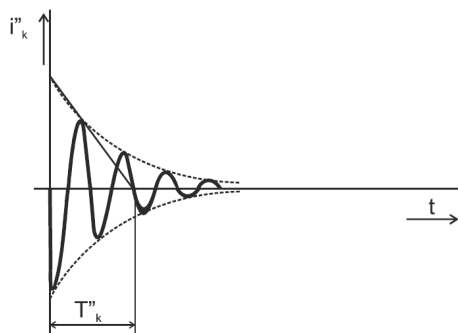
Reálný časový průběh zkratu obsahuje tyto základní složky:

Rázovou (subtranzitní) složku $i''_k(t)$ - Obr. 10 - má sinusový průběh a frekvenci soustavy a amplituda exponenciálně klesá s časovou konstantou T''_K . Projevuje se na začátku zkratu a trvá méně než desetinu sekundy, je to složka rychle doznívající.

Přechodnou (tranzitní) složku $i'_k(t)$ - Obr. 11 - má sinusový průběh a frekvenci soustavy a amplituda exponenciálně klesá s časovou konstantou T'_K . Jedná se o složku pomaleji doznívající. Doba zániku bývá zpravidla řádově v sekundách.

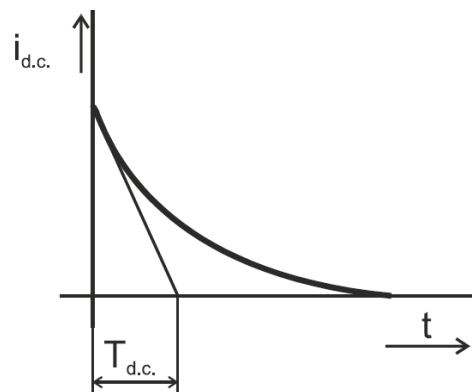
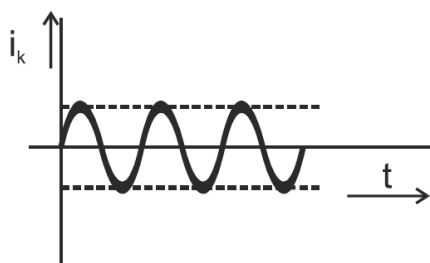
Ustálenou složku $i_k(t)$ - Obr. 12 - má sinusový průběh, frekvenci soustavy a konstantní amplitudu.

Stejnoseměrnou (aperiodickou) složku $i_{DC}(t)$ - Obr. 13 - představuje exponenciálně klesající stejnosměrný proud s časovou konstantou T_{DC} .



Obr. 10: Rázová složka zkratového proudu [6]

Obr. 11: Přechodná složka zkratového proudu [6]



Obr. 12: Ustálená složka zkratového proudu [6]

Obr. 13: Stejnoseměrná složka zkratového proudu [6]

Charakteristické hodnoty průběhu zkratového proudu jsou definovány normou [6] a slouží nám k zjednodušení popisu přechodného jevu:

- počáteční souměrný rázový zkratový proud I_k'' (initial symmetrical short-circuit current) – efektivní hodnota střídavé souměrné složky předpokládaného zkratového proudu v okamžiku vzniku zkratu, při konstantní impedanci,
- nárazový zkratový proud i_p (peak short-circuit current) – maximální možná okamžitá hodnota předpokládaného zkratového proudu,
- souměrný zkratový vypínací proud I_b (symmetrical short-circuit breaking current) – efektivní hodnota úplné periody souměrné složky předpokládaného zkratového proudu v okamžiku oddělení kontaktů prvního pólu spínacího zařízení,
- ustálený zkratový proud I_k (steady-state short-circuit current) – efektivní hodnota zkratového proudu, který zůstává po odeznění přechodného jevu,
- ekvivalentní oteplovací zkratový proud I_{th} (thermal equivalent short-circuit current) – efektivní hodnota proudu, který má stejné tepelné účinky a stejnou dobu trvání jako skutečný zkratový proud, který může obsahovat stejnosměrnou složku a s časem se mění,
- doba trvání zkratu T_k – doba od počátku vzniku zkratu do okamžiku oddělení kontaktů posledního pólu spínacího zařízení.

Zkratky se dále rozdělují podle způsobu spojení živých částí a země na:

- jednofázové (jednopolové) – spojení jedné fáze se zemí, v síti s účinně uzemněným uzlem,
- dvoufázové (dvoupólové) – spojení dvou fází,
- dvoufázové zemní (dvoupólové zemní) – spojení dvou fází se zemí,
- trojfázové (trojpolové) – spojení všech tří fází,
- trojfázové zemní (trojpolové zemní) – spojení tří fází se zemí.

5.2. Způsob výpočtu zkratových poměrů podle ČSN EN 60909

Za základní normu, pomocí které můžeme vypočítat zkratové proudy v trojfázových střídavých soustavách, považujeme normu ČSN EN 60909. Ta platí pro výpočty v trojfázových střídavých soustavách NN, VN, VVN a ZVN do 550 kV, při jmenovitém kmitočtu 50 Hz nebo 60 Hz.

5.2.1. Předpoklady výpočtu

Pro snadnější výpočet zkratových proudů v rozsáhlých sítích se vychází z následujících zjednodušení: [12]

- Po dobu trvání zkratového proudu se nemění typ zkratu, tj. trojfázový zkrat zůstává trojfázovým a zkrat mezi fází a zemí zůstává po celou dobu zkratu zkratem mezi fází a zemí;
- Po dobu zkratu nedochází k žádné změně v síti;
- Uvažují se impedance transformátorů pro přepínače odboček v základní poloze. To je přípustné, protože je zaveden korekční součinitel pro impedance KT pro síťové transformátory;
- Odpory oblouku se neuvažují;
- Všechny kapacity vedení a paralelní admitance a netočivé statické zátěže jsou zanedbány vyjma paralelních admitancí v netočivé soustavě.

Jestliže se počítají zkratové proudy v soustavách s rozdílnými hladinami napětí, je nutné přepočítat hodnoty impedancí z jedné napěťové hladiny na jinou, a to nejlépe na tu napěťovou hladinu, kde se má určit zkratový proud. [6]

5.3. Metoda výpočtu

5.3.1. Ekvivalentní napěťový zdroj v místě zkratu

Je to metoda založená na zavedení ekvivalentního napěťového zdroje v místě zkratu. Ekvivalentní napěťový zdroj je jediným aktivním napětím soustavy. Všechny ostatní síťové napáječe, synchronní a asynchronní stroje jsou nahrazeny svou vnitřní impedancí. [6]

5.3.2. Použití souměrných složek

Pro souměrné a nesouměrné zkraty je vhodné počítat zkratové proudy pomocí metody souměrných složek. Předpokládá se přitom, že elektrické zařízení má symetrickou strukturu, například v případě transponovaných venkovních vedení. Výsledky výpočtu zkratových proudů mají přijatelnou přesnost také i v případě netransponovaných venkovních vedení. [6]

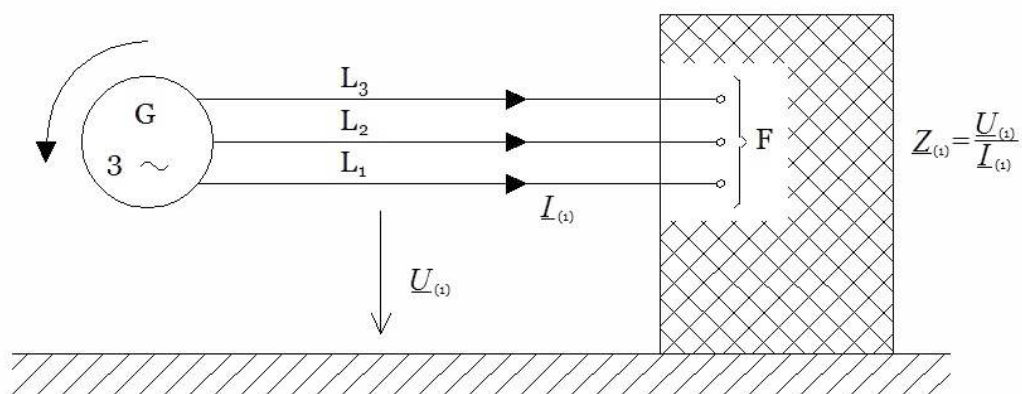
Při použití této metody se zjistí proudy v každé fázi superponováním proudů tří souměrných složkových soustav:

proud sousledné složkové soustavy $I_{(1)}$;

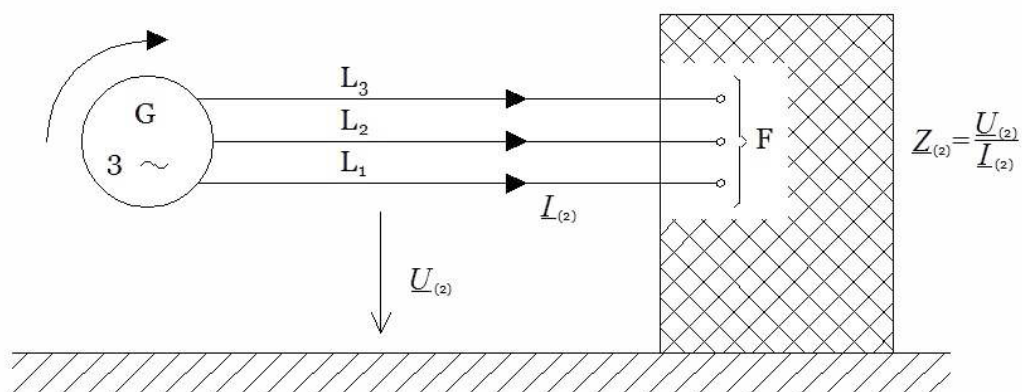
proud zpětné složkové soustavy $I_{(2)}$;

proud netočivé složkové soustavy $I_{(0)}$.

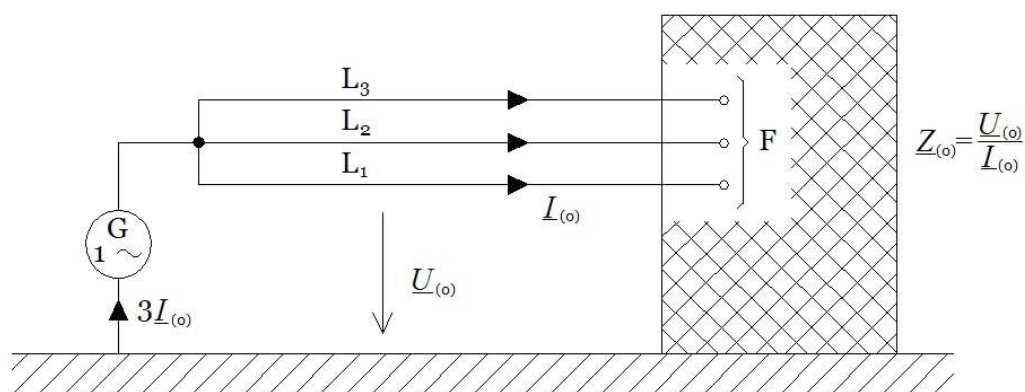
Každá z těchto tří souměrných složek soustavy má svoji vlastní impedanci. Složkové impedance prvků se určí při napájení jednotlivých prvků zdroji se souslednou (Obr. 14), zpětnou (Obr. 15) a netočivou (Obr. 16) soustavou napětí.



Obr. 14: Sousedná složka zkratové impedance $Z_{(1)}$ [6]



Obr. 15: Zpětná složka zkratové impedance $Z_{(2)}$ [6]



Obr. 16: Netočivá složka zkratové impedance $Z_{(0)}$ [6]

Je nutné rozeznávat mezi zkratovými impedancemi v místě zkratu F a zkratovými impedancemi každého elektrického zařízení.

Při výpočtu nesouměrných zkratových proudů v soustavách VN, VVN a ZVN s použitím ekvivalentního napěťového zdroje v místě zkratu se musí uvažovat kapacita netočivé složky vedení pro soustavy s izolovaným uzlem, rezonančně uzemněné soustavy a soustavy s uzemněným uzlem se zemnicím faktorem vyšším než 1,4.

5.4. Maximální zkratové proudy

Zkratové proudy zjišťujeme buď pro volbu a dimenzování elektrického zařízení na jejich účinky, nebo pro volbu a nastavení ochran ve zkratovém obvodu. [12]

Pro volbu a dimenzování elektrických zařízení určujeme největší možné hodnoty zkratového proudu. Určují se za těchto předpokladů: [12]

- pro výpočet maximálních zkratových proudů se musí použít napěťový součinitel c_{\max} podle Tab. 1.;
- zapojení soustavy (provozně přípustné) takové, které v místě zkratu dává největší zkratové proudy;
- pokud je použita ekvivalentní impedance Z_Q jako reprezentující vnější síť, musí se použít minimální ekvivalentní zkratová impedance, která odpovídá maximálnímu příspěvku zkratových proudů od síťových napáječů;
- chod motorů;
- při uvažování rezistancí R_L venkovních vedení a kabelů je jejich teplota 20 °C.

Jmenovité napětí U_n	Napěťový součinitel c pro výpočet	
	maximálních zkratových proudů c_{\max}	maximálních zkratových proudů c_{\min}
Nízké napětí 100 V až 1000 V	1,05 ^{1)*} 1,10 ^{2)*}	0,95
Vysoké napětí > 1 kV až 35 kV	1,10	1,00
Velmi vysoké napětí > 35 kV		
^{2)*} pro soustavy NN s tolerancí +6 %, například pro soustavy přecházející z 380 V na 400V		
^{2)*} pro soustavy NN s tolerancí +10 %		

Tab. 1: Napěťový součinitel c [6]

5.5. Minimální zkratové proudy

Při výpočtu minimálních zkratových proudů je nutné zvolit následující podmínky: [12]

- pro výpočet minimálních zkratových proudů se musí použít napěťový součinitel c_{\min} dle Tab. 1;
- zapojení soustavy pro zajištění jen minimálních odběrů (při paralelním spojení transformátorů a vedení se uvažuje jeden transformátor, popř. vedení odpojené);
- do zkratu pracuje snížený počet zdrojů naprázdno se jmenovitým napětím;
- vliv motorů se neuvažuje;
- při uvažování rezistancí R_L se uvažuje teplota venkovních vedení 80 °C a teplota kabelových vedení maximální přípustná.

5.6. Postup výpočtu

Při výpočtu zkratových proudů je nutný určitý postup, při kterém se v uvedeném sledu provedou základní kroky: [12]

- sestavení schématu zapojení se všemi parametry prvků, vyznačení místa zkratu, druhu, případně maximální dobu trvání zkratu;
- stanovení impedance (reaktance, činné odpory) jednotlivých prvků zkratového obvodu;
- sestavení náhradního schématu soustavy (souměrný zkrat – náhradní schéma jen pro souslednou složku, nesouměrný zkrat – náhradní schéma i pro zpětnou a netočivou složku), postupné zjednodušení, určení výsledné impedance zkratového obvodu;
- výpočet zkratových poměrů.

6. Multikriteriální analýza

6.1. Teorie multikriteriální analýzy

Teorie multikriteriálního (vícekriteriálního) rozhodování je založena na matematickém modelování, i když pro zvládnutí základů vícekriteriálních optimalizačních technik je možné vystačit s matematikou velmi jednoduchou. Toto použití matematiky za cenu vynaložení jistě námahy na studium, zajišťuje na druhé straně rigorózní přístup k výkladu problematiky optimálního rozhodování v situacích, které svou složitostí jinak přímo svádějí k řešení metodou diskuze až do úplné únavy. Některé partie, zejména z oblasti vícekriteriálního hodnocení variant, jsou navíc srozumitelné bez jakýchkoliv matematických znalostí a mohou být studovány a pochopeny nezávisle na partiích náročnějších. [2]

6.1.1. Podstata úloh vícekriteriálního rozhodování

Multikriteriální analýza (MCA), jak již název napovídá, se zabývá vyhodnocováním jednotlivých alternativ podle více kritérií. Termínem „alternativa“ označujeme každé řešení z výběrové sestavy. „Kritérium“ je vlastnost, kterou u dané alternativy posuzujeme. Každému kritériu je přiřazena váha, která vyjadřuje důležitost jednotlivých kritérií vzhledem k ostatním. Rozhodnutím rozumíme vybrání jedné varianty ze seznamu v dané situaci potenciálně realizovatelných variant na základě většího množství kritérií. Níže jsou popsány dvě metody MCA: analýza ideálních bodů (IPA) a analýza shody a neshody (CDA).

Analýza ideálních bodů (IPA)

Analýza ideálních bodů je založena na odchylce mezi souborem ideálních řešení a souborem efektivních řešení. Ačkoli ideální řešení jistě téměř neexistuje, slouží jako důležitý referenční vzor. Nejlepší kompromisní řešení se stanoví jako to řešení, které je nejméně vzdáleno od ideálního. Narůstající vzdálenost od ideálního řešení pro činitele umístěné na stupnici důležitosti výše, vyvolá větší postih, než narůstající vzdálenost od ideálního řešení pro činitele umístěné na stupnici důležitosti níže.

Analýza shody a neshody (CDA)

Analýza shody a neshody je založena na porovnání alternativ výběru po dvojicích. Měří stupeň, kterým alternativy výběru a váhy faktorů potvrzují nebo vyvracejí vzájemný poměr mezi alternativami. Rozdíly ve vahách faktorů a hodnocení kritérií jsou pomocí postupů shody a neshody analyzovány odděleně. Index shody alternativy A s alternativou B je definován jako podíl součtu vah těch kritérií, pro která je hodnocení A větší, nebo rovno hodnocení B a součtu vah všech kritérií.

Index neshody alternativy A s alternativou B je definován jako podíl, kde čítec je roven maximálnímu rozdílu vážených hodnocení, pro které je hodnocení A menší než hodnocení B a jmenovatel je roven maximálnímu rozdílu vážených hodnocení všech alternativ pro kritérium vykazující maximální hodnotu výše definovaného čitatele.

Srovnání metod analýzy IPA a CDA

Metoda IPA je závislá na váhách kritérií tak, že i pouze jediné vysoké hodnocení alternativy pro kritérium s vysokou váhou řadí tuto alternativu na začátek souboru řešení. U metody CDA řešení závisí jednak na vážených hodnoceních, a jednak na váhách samotných. Za výhodu metody CDA tedy můžeme považovat její oddělený postup, kdy indexem shody jsou nejdříve vyhodnocovány váhy kritérií na základě porovnání nevážených hodnocení a indexem neshody jsou vyhodnocována vážená hodnocení jednotlivých alternativ. Analýza ideálních bodů je oproti analýze shody a neshody jednodušší. Chceme-li rozšířit soubor alternativ, stačí pouze určit pro nové alternativy vzdálenost od ideálního řešení a zařadit je do stávajícího souboru řešení. Pro metodu CDA je nutno provést nový výpočet, protože dochází k porovnání všech alternativ vzájemně. Co se tedy vhodnosti použití obou metod týče, jeví se metoda IPA vhodná spíše v počátku rozpracovávání daného problému, jako orientační řešení. Metoda CDA je značně složitější, a proto je vhodná pro závěrečné rozhodování s důrazem na objektivitu finálního řešení.

Další metody MCA

Jako další vhodné metody multikriteriální analýzy využitelné v elektroenergetice se jeví například metoda WSA (metoda váženého součtu) a metoda TOPSIS (metoda minimalizace vzdálenosti od ideální vzdálenosti). Tyto metody pracují na podobných principech jako výše uvedené metody IPA a CDA.

6.1.2. Klasifikace úloh vícekritériálního rozhodování

Rozhodovací úlohy, v nichž se důsledky rozhodnutí posuzují podle více kritérií, se nazývají úlohami vícekritériálního rozhodování, někdy se překládá výraz vícekritériální jako multikriteriální z anglického multicriterion. [2]

Protože do této kategorie spadají úlohy velmi různorodé, není dost dobře možné předložit univerzální teorii a z ní vyplývající rozhodovací algoritmus, vhodný pro všechny typy úloh. Rozhodování v úlohách vícekritériální optimalizace spočívá v transformaci informací, které máme k dispozici o rozhodovacích variantách a o cílech sledovaných uživatelem. Jiným důležitým hlediskem pro klasifikaci úloh jsou tedy informace, které jsou součástí zadání úlohy, nebo které lze získat v průběhu jejího řešení. Podle tohoto informačního hlediska rozdělíme úlohy vícekritériálního rozhodování do čtyř kategorií: [2]

1. úlohy s informací umožňující skalarizaci optimalizačního kritéria (s kardinální informací o kritériích). Mohlo by se zdát, že úlohy z této kategorie do vícekritériálního rozhodování nepatří, neboť jde vlastně o úlohu jednokriteriální. Pro zařazení je však důležité, že úloha je původně formulována jako vícekritériální a navíc je zde informace umožňující shrnutí více kritérií do jednoho kritéria skalárního. Teorie vícekritériálního rozhodování je zde nutná k tomu, aby uvedená redukce na skalár byla provedena kvalifikovaně tak, aby nedošlo ke ztrátě nebo ke zkreslení původních informací.
2. úlohy bez informace umožňující skalarizaci. Úlohy této kategorie jsou jádrem teorie i praxe vícekritériálního rozhodování. Základním pojmem, se kterým se zde pracuje, je pojem nedominovaného řešení.

3. úlohy s informací získanou v průběhu řešení. Někdy je obtížné získat potřebné informace předem, neboť uživatel a ani analytik předem nevědí, co všechno je pro řešení vícekritériální úlohy relevantní. Proto byly vyvinuty postupy, které umožňují získávat informace od uživatele v průběhu řešení úlohy a to zpravidla prostřednictvím dialogu uživatele s počítačovým programem.
4. Parametrická řešení. Mnozí uživatelé jsou si závislosti výsledného řešení na ne vždy spolehlivé počáteční informaci dobře vědomi. Dávají proto přednost širšímu náhledu do problematiky před více či méně jednoznačným doporučením k akci.

6.1.3. Základní pojmy úloh vícekritériálního rozhodování

V úlohách vícekritériálního hodnocení variant (ÚVHV) má množina rozhodovacích variant, kterou označme A , konečný počet prvků. Po úvodních úkonech, spočívajících v určení hodnotících kritérií a metody získání kvantitativních údajů o hodnotách těchto kritérií pro jednotlivé rozhodovací varianty, lze ÚVHV charakterizovat tzv. kritériální maticí. V této matici sloupce odpovídají kritériím a řádky hodnoceným variantám. Označíme-li prvky kritériální matice y_{ij} , kde $i = 1, 2, \dots, p$ a $j = 1, 2, \dots, k$, můžeme kritériální matici zapsat ve tvaru: [2]

$$\begin{matrix} & f_1 & f_2 & \cdots & f_k \\ \begin{matrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_p \end{matrix} & \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} & \cdots & y_{1k} \\ y_{21} & y_{22} & \cdots & y_{2k} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ y_{p1} & y_{p2} & \cdots & y_{pk} \end{bmatrix} \end{matrix}$$

Pokud není výslovně uvedeno jinak, tak se předpokládá, že všechna kritéria v ÚVHV jsou stanovena jako maximalizační. Tím se rozumí, že varianta je tím lepší, čím je hodnota kritéria větší. [2]

Jestliže jsou v původním zadání úlohy některá z kritérií uvedena jako minimalizační, nebývá obtížné tato kritéria přetransformovat tak, aby byla maximalizační. [2]

Definice nedominované varianty: Zjednodušeně lze říci, že nedominovaná varianta je taková, ke které neexistuje lepší v tom smyslu, že by bylo možné některé hodnoty kritérií zlepšit, aniž by se hodnoty jiných kritérií zhoršily. [2]

Často používaným pojmem v teorii vícekritériálního rozhodování je optimální varianta. Na rozdíl od pojmu nedominovaná varianta není tento pojem spojen s žádnou jednoznačnou a univerzálně použitelnou definicí. Pojmem optimální varianta se označuje varianta relativně jednoznačně doporučená ke konečnému výběru nebo realizaci. [2]

Je-li v množině A jediná nedominovaná varianta, je možné ji beze vší pochybnosti označit za optimální variantu. Typickým případem však je, že nedominovaných variant je více. Často se lze v praxi setkat s případy, že $A_N = A$. Je-li totiž rozhodovací situace jen trochu přehledná a je-li uživatel seznámen s problematikou, podaří se mu dominované varianty předem vyloučit. Je-li v množině A_N více variant a je-li nutné doporučit pouze variantu jedinou, je nutné aplikovat metody, které vyberou z množiny A_N v jistém smyslu reprezentativní variantu. Varianta, která je vybrána jako reprezentant množiny A_N se nazývá kompromisní (někdy také nejlepší kompromisní varianta). [2]

Při konstrukci metody výběru kompromisní varianty je užitečné vědět, jaký může v dané rozhodovací situaci nastat potenciálně nejlepší případ. Hypotetickou nebo reálně existující variantu, která dosahuje ve všech kritériích logicky nejlepší možné hodnoty, nazýváme ideální variantou. [2]

Mezi případy, kdy je ideální varianta odvozena z úrovní kritérií, které mohou být reálně všechny současně dosaženy, a kdy je odvozena pouze z dat vystupujících v kritériální matici, je jistý rozdíl. V prvním případě se mluví o absolutní ideální variantě a ve druhém případě o relativní ideální variantě. Pro úplnost je vhodné uvést i případ, kdy část nejlepších hodnot kritérií je odvozena z absolutních stupnic a část pouze z dat uvedených v kritériální matici. Takto zkonstruovaná ideální varianta se nazývá smíšená. [2]

Protějškem ideální varianty je varianta (hypotetická nebo skutečná), která má všechny hodnoty kritérií na nejnižším stupni. Takovou variantu můžeme nazvat variantou bazální. Obdobně jako v případě ideální varianty lze definovat i bazální variantu absolutní, relativní a smíšenou. [2]

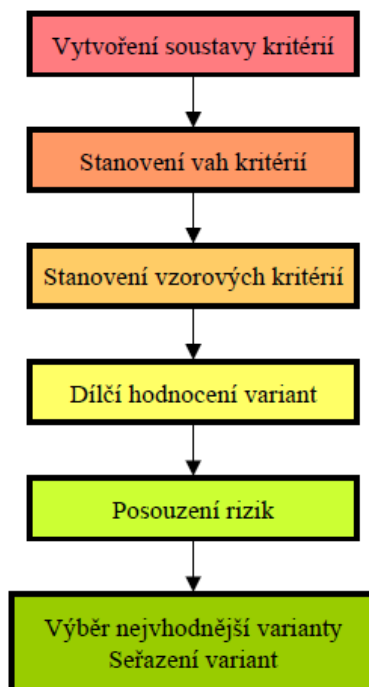
6.2. Obecný postup multikritériálního hodnocení variant

Pro standardizaci, vymezení a výběr metod vícekritériálního hodnocení variant sloužících na podporu rozhodování je nutno znát: [2]

- O čem se má rozhodovat,
- jaké cíle mají být splněny (jakých cílů má být dosaženo a za jakých podmínek),
- z jakých hledisek se má rozhodovat (jaká hlediska má rozhodovací subjekt respektovat),
- k jakému časovému horizontu bude výsledek rozhodování působit.

Obecný postup vícekritériálního hodnocení variant zahrnuje na zvolené rozlišovací úrovni šest relativně samostatných kroků: [2]

1. vytvoření účelově orientované množiny kritérií hodnocení,
2. stanovení vah kritérií hodnocení,
3. stanovení vzorových hodnot vah kritérií (etalonů),
4. hodnocení dosažených výsledků (důsledků, užitků, ale i případných škod nebo ztrát) variant; jde o dílčí hodnocení variant a jejich syntézu v celkové vyhodnocení,
5. posouzení rizika spojeného s případnou realizací variant,
6. určení preferenčního pořadí variant a výběr nejlepší varianty.



Obr. 17: Obecný postup vícekritériálního hodnocení variant

Obecný postup vícekritériálního hodnocení variant (viz. Obr. 17) jako nedílná součást vícekritériálního rozhodování o variantách předpokládá, že jsou k dispozici alespoň dvě varianty možných řešení z předmětné oblasti. [2]

Není-li splněn tento předpoklad, nejde o multivariantní hodnocení, ale o zvláštní - i když v praxi poměrně často se vyskytující - případ jednovariantního vícekritériálního hodnocení, jehož cílem není výběr optimální varianty, nýbrž podklad pro vytvoření určitého typu formalizovaného závěru (stanoviska) k předložené variantě. V tomto případě přejímá funkci další varianty tzv. základní (etalonová) varianta, s kterou se posuzovaná varianta srovnává a hodnotí. Její existence je tak pro jednovariantní vícekritériální hodnocení nutnou podmínkou. [2]

6.2.1. Výběr nejvhodnější varianty

Varianta, která je nejvhodnější pro řešení daného rozhodovacího problému, vyplýne z předchozích pěti kroků vícekritériálního hodnocení variant. Nicméně se vlastní akt doporučení nejvhodnější varianty k rozhodnutí o její implementaci zpravidla považuje za relativně samostatný postupový krok. [2]

Pokud zvolená varianta nekoresponduje s výběrem podle formalizovaného postupu vícekritériálního hodnocení, došlo v posledním kroku k určitému zásahu, který je sice z hlediska subjektu rozhodování oprávněný, nicméně představuje určité porušení pravidel postupu. [2]

Úvahy, vedené případně v rámci posledního kroku (ať jednotlivcem či skupinou expertů, totožnými či odlišnými od jednotlivce nebo týmu, který prováděl hodnocení), nepředstavují totiž nic jiného než dílčí nebo celkovou revizi některého z předchozích kroků (např. přidání dalšího kritéria, posílení váhy některého kritéria apod.). [2]

Na šestý krok obecného postupu vícekritériálního hodnocení variant by tedy mělo být nahlíženo jako na krok, umožňující případné iterace, a nikoliv jako na "právo" rozhodovatele vyslovit "konečný soud" v předmětném rozhodovacím procesu. [2]

6.2.2. Vzájemná závislost a podmíněnost kritérií

U většího souboru kritérií se jen málokdy podaří zabránit tomu, aby neobsahoval i kritéria vzájemně závislá, podmíněná. K řešení těchto případů se v teorii a praxi vícekritériálního hodnocení variant využívá příslušný matematický aparát, který rozlišuje dva základní druhy závislostí mezi veličinami: závislost pevnou (funkční) a závislost volnou (statistickou). [2]

Funkční závislost se v aplikaci na vzájemnou závislost kritérií v určitém souboru interpretuje tak, že hodnotě jednoho kritéria nebo hodnotám několika kritérií odpovídá podle nějakého (matematického) funkčního vztahu jednoznačně hodnota jiného kritéria. [2]

Statistická závislost mezi kritérii může, ale také nemusí, být projevem příčinného vztahu. Proto je nezbytné doplňovat pokaždé formalizovaný přístup, analýzu závislosti kritérií, neformalizovaným přístupem, věcným rozбором vztahů mezi vlastnostmi vybranými do soustavy kritérií. Teprve na jeho podkladě lze prokazovat, zda existují věcné návody pro závěr, že mezi kritérii existuje příčinný vztah. [2]

Jinou z často se vyskytujících příčin statistické závislosti kritérií je obsahové překrývání dvojic kritérií. Tento jev - pokud nastane - musí být respektován zmenšením vah takové dvojice kritérií. Situace je však složitější v případě, že se překrývá obsah více n -tic kritérií. Pak již nelze apriorně odhadnout, která kritéria by měla svou relativní váhu snížit a která zvýšit. [2]

Výsledkem analýzy vzájemné závislosti kritérií může být buď snížení počtu kritérií nebo korekce vah kritérií. [2]

7. Analýza stávajících rozvodů

V současné době jsou objekty napájeny kabelovým vedením společnosti ČEZ Distribuce a.s. Za účelem šetření finančních prostředků vznikla myšlenka stávající síť ČEZ nahradit vlastní sítí. Přípojka VN je stávající. Ta je připojena zemním kabelem na venkovní síť VN.

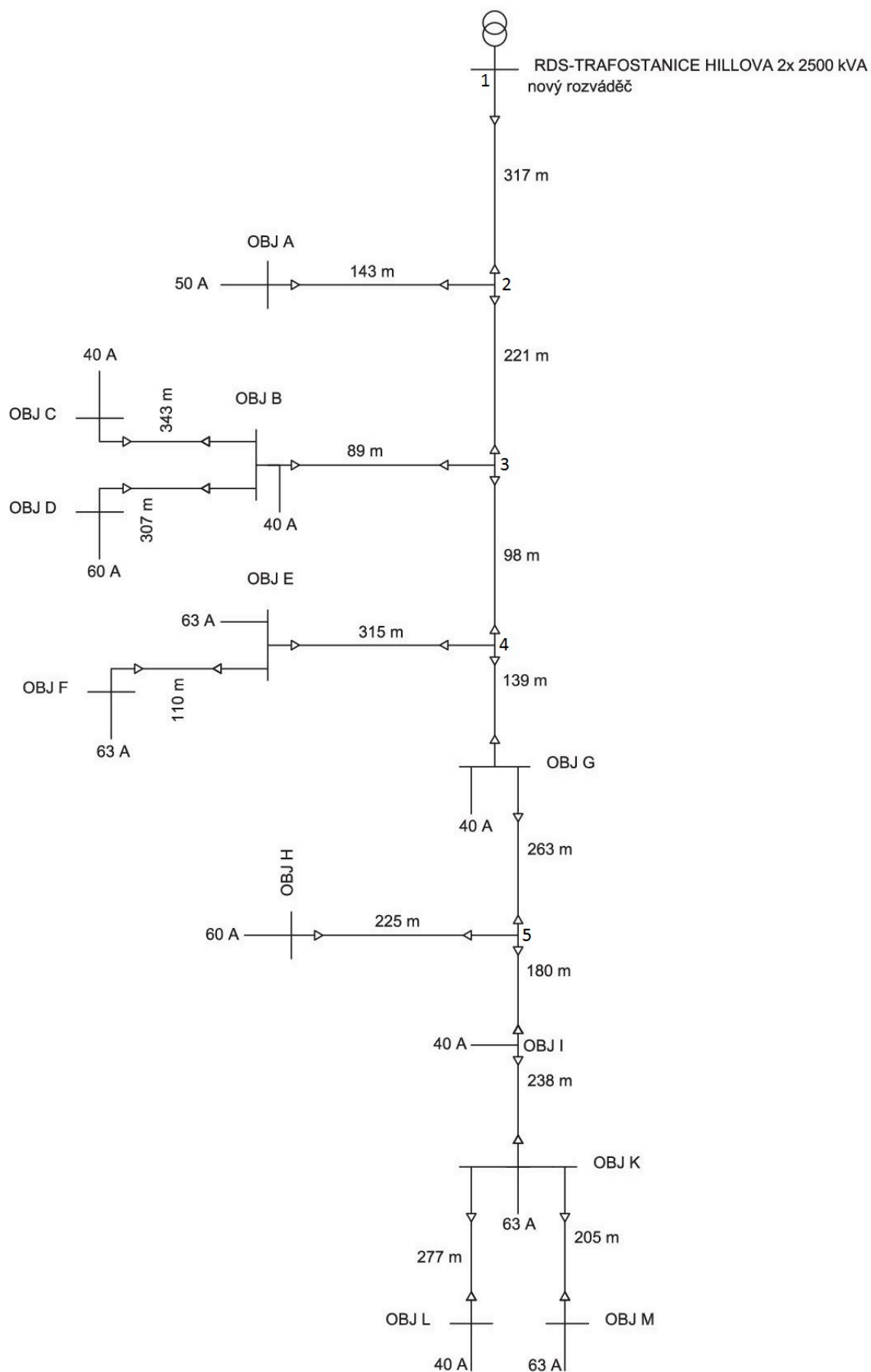
Pro snížení napětí z 22kV na 400V jsou použity dva suché transformátory typu DTIHIL 2500/20 od výrobce Elpro-Energo s.r.o.

Transformátory mají tyto parametry:

Výkon	2500 kVA
Vyšší napětí	22000 V
Nižší napětí	400 V
Frekvence	50 Hz
Skupina zapojení	Dyn1
Napětí nakrátko	6%

Síť bude navržena v několika variantách (Kabelová trasa na Obr. 18)

- Zbudování sítě v celé délce teplovodu, materiál měď.
- Zbudování sítě od trafostanice po odběrné místo G, materiál měď
- Zbudování sítě od trafostanice po odběrné místo G s uvažováním dokončení po 5-ti letech, materiál měď
- Zbudování sítě v celé délce teplovodu, materiál hliník.
- Zbudování sítě od trafostanice po odběrné místo G, materiál hliník
- Zbudování sítě od trafostanice po odběrné místo G s uvažováním dokončení po 5-ti letech, materiál hliník



Obr. 18: Kabelová trasa

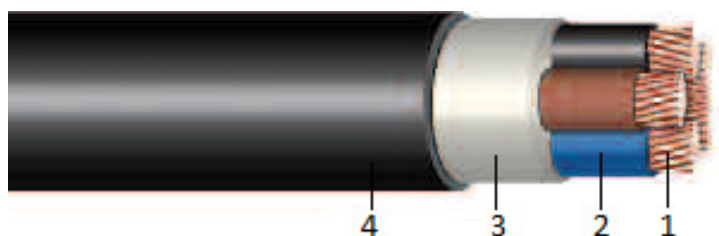
8. Vlastní návrh sítě

V projektu budou použity kabely typu 1-CYKY a 1-AYKY.

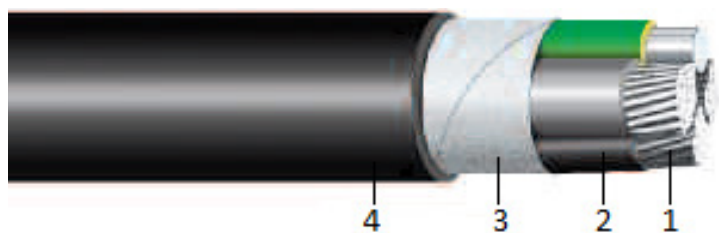
Velikosti průřezů budou určeny s ohledem na úbytky napětí a proudovou zatížitelnost kabelů. Mechanickou pevnost vedení není třeba řešit, protože se jedná o kabelovou síť. Kontrola hospodárnosti průřezu je potřeba jen v těch případech, kde počet hodin doby plných ztrát za rok je větší než asi 1000 hodin, což zde není. Z toho důvodu se hospodárností průřezu nebudu dále zabývat. Výpočtový výkon se rovná výkonu instalovanému, protože součinitel náročnosti $\beta = 1$.

Konstrukce kabelu:

1. Jádro (měděné nebo hliníkové)
2. PVC izolace
3. Výplňový obal
4. PVC plášť



Obr. 19: Kabel 1-CYKY [11]



Obr. 20: Kabel 1-AYKY [11]

8.1. Návrh sítě pro jednotlivé varianty

Odvození

$$\Delta U = R \cdot I_{\zeta} + X \cdot I_j = R \cdot I \cdot \cos \varphi + X \cdot I \cdot \sin \varphi = \frac{\rho \cdot l}{S} \cdot I \cdot \cos \varphi + X_K \cdot l \cdot I \cdot \sin \varphi$$

Pro paprsek s jedním odběrem:

$$S = \frac{\rho \cdot l \cdot I \cdot \cos \varphi}{\Delta U - X_K \cdot 10^{-3} \cdot l \cdot I \cdot \sin \varphi}$$

Pro paprsek s více odběry:

$$\Delta U = \Delta U_1 + \Delta U_2 + \dots + \Delta U_n = \sum_{i=1}^n \Delta U_i = \sum_{i=1}^n \frac{\rho_i \cdot l_i}{S_i} \cdot I_i \cdot \cos \varphi_i + X_{Ki} \cdot 10^{-3} \cdot I_i \cdot l_i \cdot \sin \varphi_i$$

Měrný odpor a účinník budou všude stejné ($\cos \varphi = 0,95$, $\rho_{Cu} = \frac{1}{33} \Omega \cdot m^{-1} \cdot mm^{-2}$, $\rho_{Al} = \frac{1}{33} \Omega \cdot m^{-1} \cdot mm^{-2}$). Pro výpočet použiji hodnotu reaktance $X_k = 0,08 \Omega \cdot km^{-1}$ stejnou pro všechny kabely (pro výpočet skutečných úbytků a ztrát použiji tabulkové hodnoty udávané výrobcem [11]).

$$\Delta U = \rho \cdot \cos \varphi \cdot \sum_{i=1}^n l_i \cdot \frac{I_i}{S_i} + X_K \cdot 10^{-3} \cdot \sin \varphi \cdot \sum_{i=1}^n I_i \cdot l_i$$

Nahradíme $\frac{I}{S}$ proudovou hustotou σ

$$\Delta U = \rho \cdot \cos \varphi \cdot \sum_{i=1}^n l_i \cdot \sigma_i + X_K \cdot 10^{-3} \cdot \sin \varphi \cdot \sum_{i=1}^n I_i \cdot l_i$$

Proudová hustota bude stejná v celé hlavní větvi

$$\Delta U = \rho \cdot \cos \varphi \cdot \sigma \cdot \sum_{i=1}^n l_i + X_K \cdot 10^{-3} \cdot \sin \varphi \cdot \sum_{i=1}^n I_i \cdot l_i$$

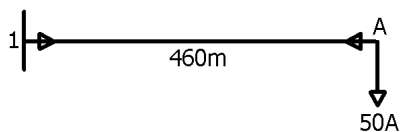
Po úpravě

$$\frac{1}{\sigma} = \frac{\rho \cdot \cos \varphi \cdot \sum_{i=1}^n l_i}{\Delta U - X_K \cdot 10^{-3} \cdot \sin \varphi \cdot \sum_{i=1}^n I_i \cdot l_i}$$

$$S_i = I_i \cdot \frac{1}{\sigma}$$

8.1.1. Varianta 1

Větev 1-A



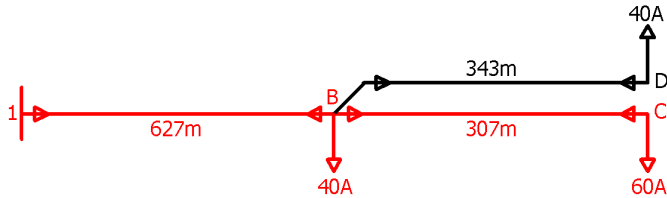
$$S_{1A} = \frac{\rho \cdot l_{1A} \cdot I_{1A} \cdot \cos \varphi}{\Delta U - X_K \cdot 10^{-3} \cdot l_{1A} \cdot I_{1A} \cdot \sin \varphi} = \frac{460 \cdot 50 \cdot 0,95}{57 \cdot (11,5 - 0,08 \cdot 10^{-3} \cdot 460 \cdot 50 \cdot 0,31)} =$$

$$= 35,1 \text{ mm}^2 \rightarrow 50 \text{ mm}^2$$

$$\Delta U_A = \frac{\rho \cdot l_{1A}}{S_{1A}} \cdot I_{1A} \cdot \cos \varphi + X_K \cdot 10^{-3} \cdot I_{1A} \cdot l_{1A} \cdot \sin \varphi =$$

$$= \frac{460}{57 \cdot 50} \cdot 50 \cdot 0,95 + 0,0848 \cdot 10^{-3} \cdot 50 \cdot 460 \cdot 0,31 = 8,28 \text{ V}$$

Větev 1-B(CD)



Větší proudový moment je u větve 1-B-D

$$\frac{1}{\sigma_{1BD}} = \frac{\rho \cdot \cos \varphi \cdot (l_{1B} + l_{BD})}{\Delta U - X_K \cdot 10^{-3} \cdot \sin \varphi \cdot (l_{1B} \cdot I_{1B} + l_{BD} \cdot I_{BD})} =$$

$$= \frac{0,95 \cdot (627 + 307)}{57(11,5 - 0,08 \cdot 10^{-3} \cdot 0,31 \cdot (627 \cdot 140 + 307 \cdot 60))} = 1,76 \text{ mm}^2 \cdot \text{A}^{-1}$$

$$S_{1B} = I_{1B} \cdot \frac{1}{\sigma_{1BD}} = 140 \cdot 1,76 = 246,3 \text{ mm}^2 \rightarrow 240 \text{ mm}^2$$

$$S_{BD} = I_{BD} \cdot \frac{1}{\sigma_{1BD}} = 60 \cdot 1,76 = 105,6 \text{ mm}^2 \rightarrow 120 \text{ mm}^2$$

$$\Delta U_B = \frac{\rho \cdot l_{1B}}{S_{1B}} \cdot I_{1B} \cdot \cos \varphi + X_K \cdot 10^{-3} \cdot I_{1B} \cdot l_{1B} \cdot \sin \varphi =$$

$$= \frac{627}{57 \cdot 240} \cdot 140 \cdot 0,95 + 0,0785 \cdot 10^{-3} \cdot 140 \cdot 627 \cdot 0,31 = 8,25 \text{ V}$$

$$\Delta U_D = \Delta U_B + \frac{307}{S_{BD}} \cdot I_{BD} \cdot \cos \varphi + X_K \cdot 10^{-3} \cdot I_{BD} \cdot l_{BD} \cdot \sin \varphi =$$

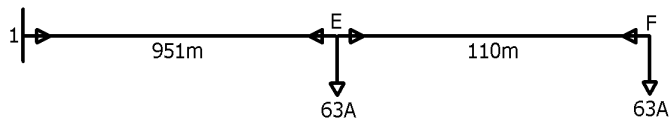
$$= 8,25 + \frac{307}{57 \cdot 120} \cdot 60 \cdot 0,95 + 0,0785 \cdot 10^{-3} \cdot 60 \cdot 307 \cdot 0,31 = 11,26 \text{ V}$$

$$S_{BC} = \frac{\rho \cdot l_{BC} \cdot I_{BC} \cdot \cos \varphi}{(\Delta U - \Delta U_B) - X_K \cdot 10^{-3} \cdot l_{BC} \cdot I_{BC} \cdot \sin \varphi} = \frac{343 \cdot 50 \cdot 0,95}{57 \cdot (3,25 - 0,08 \cdot 10^{-3} \cdot 343 \cdot 50 \cdot 0,31)}$$

$$= 78,6 \text{ mm}^2 \rightarrow 95 \text{ mm}^2$$

$$\Delta U_C = \Delta U_B + \frac{l_{CD}}{S_{CD}} \cdot I_{CD} \cdot \cos \varphi + X_K \cdot 10^{-3} \cdot I_{CD} \cdot l_{CD} \cdot \sin \varphi =$$

$$= 8,25 + \frac{343}{57 \cdot 95} \cdot 40 \cdot 0,95 + 0,0817 \cdot 10^{-3} \cdot 40 \cdot 343 \cdot 0,31 = 11,01 \text{ V}$$

Větev 1-E(F)

$$\frac{1}{\sigma_{1EF}} = \frac{\rho \cdot \cos \varphi \cdot (l_{1E} + l_{EF})}{\Delta U - X_K \cdot 10^{-3} \cdot \sin \varphi \cdot (l_{1E} \cdot I_{1E} + l_{EF} \cdot I_{EF})} =$$

$$= \frac{0,95 \cdot (951 + 110)}{57(11,5 - 0,08 \cdot 10^{-3} \cdot 0,31 \cdot (951 \cdot 126 + 110 \cdot 63))} = 2,12 \text{ mm}^2 \cdot \text{A}^{-1}$$

$$S_{1E} = I_{1E} \cdot \frac{1}{\sigma_{1EF}} = 126 \cdot 2,12 = 267,4 \text{ mm}^2 \rightarrow 2 \times 120 \text{ mm}^2$$

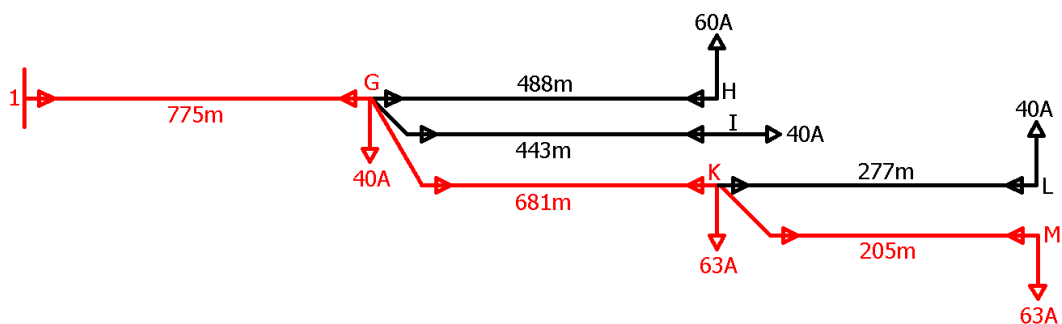
$$S_{EF} = I_{EF} \cdot \frac{1}{\sigma_{1EF}} = 63 \cdot 2,12 = 133,7 \text{ mm}^2 \rightarrow 120 \text{ mm}^2$$

$$\Delta U_E = \frac{\rho \cdot l_{1E}}{S_{1E}} \cdot I_{1E} \cdot \cos \varphi + X_K \cdot 10^{-3} \cdot I_{1E} \cdot l_{1E} \cdot \sin \varphi =$$

$$= \frac{951}{57 \cdot 2 \cdot 120} \cdot 126 \cdot 0,95 + \frac{0,0785}{2} \cdot 10^{-3} \cdot 126 \cdot 951 \cdot 0,31 = 9,79 \text{ V}$$

$$\Delta U_F = \Delta U_E + \frac{l_{EF}}{S_{EF}} \cdot I_{EF} \cdot \cos \varphi + X_K \cdot 10^{-3} \cdot I_{EF} \cdot l_{EF} \cdot \sin \varphi =$$

$$= 9,79 + \frac{110}{57 \cdot 120} \cdot 63 \cdot 0,95 + 0,0785 \cdot 10^{-3} \cdot 63 \cdot 110 \cdot 0,31 = 10,92 \text{ V}$$

Větev 1-G(HIKLM)

Největší proudový moment je u větve 1-G-K-M

$$\frac{1}{\sigma_{1GKM}} = \frac{\rho \cdot \cos \varphi \cdot (l_{1G} + l_{GK} + l_{KM})}{\Delta U - X_K \cdot 10^{-3} \cdot \sin \varphi \cdot (l_{1G} \cdot I_{1G} + l_{GK} \cdot I_{GK} + l_{KM} \cdot I_{KM})} =$$

$$= \frac{0,95 \cdot (775 + 681 + 205)}{57 \left(11,5 - 0,08 \cdot 10^{-3} \cdot 0,31 \cdot \left(775 \cdot \frac{306}{4} + 681 \cdot \frac{166}{3} + 205 \cdot 63 \right) \right)} = 3,16 \text{ mm}^2 \cdot \text{A}^{-1}$$

$$S_{1G} = I_{GK} \cdot \frac{1}{\sigma_{1GKM}} = 306 \cdot 3,16 = 967,6 \text{ mm}^2 \rightarrow 4 \times 240 \text{ mm}^2$$

$$S_{GK} = I_{GK} \cdot \frac{1}{\sigma_{1GKM}} = 166 \cdot 3,16 = 524,9 \text{ mm}^2 \rightarrow 3 \times 185 \text{ mm}^2$$

$$S_{KM} = I_{KM} \cdot \frac{1}{\sigma_{1GKM}} = 63 \cdot 3,16 = 199,2 \text{ mm}^2 \rightarrow 185 \text{ mm}^2$$

$$\begin{aligned} \Delta U_G &= \frac{\rho \cdot l_{1G}}{S_{1G}} \cdot I_{1G} \cdot \cos \varphi + X_K \cdot 10^{-3} \cdot I_{1G} \cdot l_{1G} \cdot \sin \varphi = \\ &= \frac{951}{57 \cdot 4 \cdot 240} \cdot 306 \cdot 0,95 + \frac{0,0785}{4} \cdot 10^{-3} \cdot 306 \cdot 951 \cdot 0,31 = 5,57 \text{ V} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta U_K &= \Delta U_G + \frac{l_{GK}}{S_{GK}} \cdot I_{GK} \cdot \cos \varphi + X_K \cdot 10^{-3} \cdot I_{GK} \cdot l_{GK} \cdot \sin \varphi = \\ &= 5,57 + \frac{681}{57 \cdot 3 \cdot 185} \cdot 166 \cdot 0,95 + \frac{0,0785}{3} \cdot 10^{-3} \cdot 166 \cdot 681 \cdot 0,31 = 9,89 \text{ V} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta U_M &= \Delta U_K + \frac{l_{KM}}{S_{KM}} \cdot I_{KM} \cdot \cos \varphi + X_K \cdot 10^{-3} \cdot I_{KM} \cdot l_{KM} \cdot \sin \varphi = \\ &= 9,89 + \frac{205}{57 \cdot 185} \cdot 63 \cdot 0,95 + 0,0785 \cdot 10^{-3} \cdot 63 \cdot 205 \cdot 0,31 = 11,37 \text{ V} \end{aligned}$$

$$S_{GH} = \frac{\rho \cdot l_{GH} \cdot I_{GH} \cdot \cos \varphi}{(\Delta U - \Delta U_G) - X_K \cdot 10^{-3} \cdot l_{GH} \cdot I_{GH} \cdot \sin \varphi} = \frac{488 \cdot 60 \cdot 0,95}{57 \cdot (5,93 - 0,08 \cdot 10^{-3} \cdot 488 \cdot 60 \cdot 0,31)}$$

$$= 93,9 \text{ mm}^2 \rightarrow 95 \text{ mm}^2$$

$$\begin{aligned} \Delta U_H &= \Delta U_G + \frac{l_{GH}}{S_{GH}} \cdot I_{GH} \cdot \cos \varphi + X_K \cdot 10^{-3} \cdot I_{GH} \cdot l_{GH} \cdot \sin \varphi = \\ &= 5,57 + \frac{488}{57 \cdot 95} \cdot 60 \cdot 0,95 + 0,0817 \cdot 10^{-3} \cdot 60 \cdot 488 \cdot 0,31 = 11,45 \text{ V} \end{aligned}$$

$$S_{GI} = \frac{\rho \cdot l_{GI} \cdot I_{GI} \cdot \cos \varphi}{(\Delta U - \Delta U_G) - X_K \cdot 10^{-3} \cdot l_{GI} \cdot I_{GI} \cdot \sin \varphi} = \frac{443 \cdot 40 \cdot 0,95}{57 \cdot (5,93 - 0,08 \cdot 10^{-3} \cdot 443 \cdot 40 \cdot 0,31)} =$$

$$= 53,8 \text{ mm}^2 \rightarrow 70 \text{ mm}^2$$

$$\begin{aligned} \Delta U_I &= \Delta U_G + \frac{l_{GI}}{S_{GI}} \cdot I_{GI} \cdot \cos \varphi + X_K \cdot 10^{-3} \cdot I_{GI} \cdot l_{GI} \cdot \sin \varphi = \\ &= 5,57 + \frac{443}{57 \cdot 70} \cdot 40 \cdot 0,95 + 0,0817 \cdot 10^{-3} \cdot 40 \cdot 443 \cdot 0,31 = 10,24 \text{ V} \end{aligned}$$

$$S_{KL} = \frac{\rho \cdot l_{KL} \cdot I_{KL} \cdot \cos \varphi}{(\Delta U - \Delta U_K) - X_K \cdot 10^{-3} \cdot l_{KL} \cdot I_{KL} \cdot \sin \varphi} = \frac{277 \cdot 40 \cdot 0,95}{57 \cdot (1,61 - 0,08 \cdot 10^{-3} \cdot 277 \cdot 40 \cdot 0,31)} =$$

$$= 138,5 \text{ mm}^2 \rightarrow 150 \text{ mm}^2$$

$$\Delta U_L = \Delta U_K + \frac{l_{KL}}{S_{KL}} \cdot I_{KL} \cdot \cos \varphi + X_K \cdot 10^{-3} \cdot I_{KL} \cdot l_{KL} \cdot \sin \varphi =$$

$$= 9,89 + \frac{277}{57 \cdot 95} \cdot 40 \cdot 0,95 + 0,0785 \cdot 10^{-3} \cdot 40 \cdot 277 \cdot 0,31 = 11,39 \text{ V}$$

Shrnutí

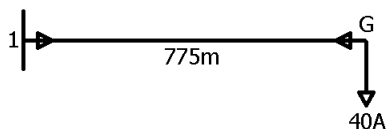
Úsek	Délka (m)	Proud (A)	Průřez (mm ²)	Úbytek na úseku (V)	Celkový úbytek v místě odběru (V)
1A	460	50	50	8,28	8,28
1B	627	140	240	8,25	8,25
BC	343	40	95	2,76	11,01
BD	307	60	120	3,01	11,26
1E	951	126	2x120	9,79	9,79
EF	110	63	120	11,13	10,92
1G	775	306	4x240	5,57	5,57
GH	488	60	95	5,58	11,45
GI	443	40	70	4,67	10,24
GK	681	166	3x185	4,32	9,89
KL	277	40	150	1,50	11,39
KM	205	63	185	1,48	11,37

Tab. 2: Přehled průřezů a úbytků pro 1. variantu

8.1.2. Varianta 2

Hodnoty pro A-F jsou stejné jako v předchozí variantě

Větev 1-G



$$S_{1A} = \frac{\rho \cdot l_{1G} \cdot I_{1G} \cdot \cos \varphi}{\Delta U - X_K \cdot 10^{-3} \cdot l_{1G} \cdot I_{1G} \cdot \sin \varphi} = \frac{775 \cdot 40 \cdot 0,95}{57 \cdot (11,5 - 0,08 \cdot 10^{-3} \cdot 775 \cdot 40 \cdot 0,31)} =$$

$$= 48,2 \text{ mm}^2 \rightarrow 50 \text{ mm}^2$$

$$\Delta U_G = \frac{\rho \cdot l_{1G}}{S_{1G}} \cdot I_{1G} \cdot \cos \varphi + X_K \cdot 10^{-3} \cdot I_{1G} \cdot l_{1G} \cdot \sin \varphi =$$

$$= \frac{775}{57 \cdot 50} \cdot 40 \cdot 0,95 + 0,0848 \cdot 10^{-3} \cdot 40 \cdot 775 \cdot 0,31 = 11,15 \text{ V}$$

Shrnutí

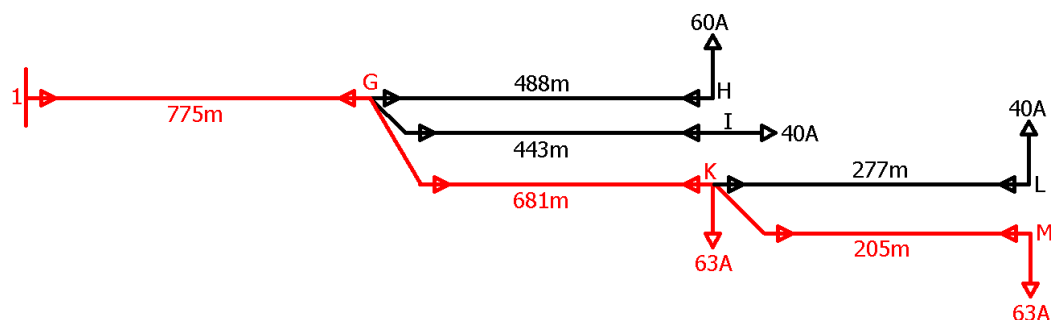
Úsek	Délka (m)	Proud (A)	Průřez (mm ²)	Úbytek na úseku (V)	Celkový úbytek v místě odběru (V)
1A	460	50	50	8,28	8,28
1B	627	140	240	8,25	8,25
BC	343	40	95	2,76	11,01
BD	307	60	120	3,01	11,26
1E	951	126	2x120	9,79	9,79
EF	110	63	120	11,13	10,92
1G	775	40	50	11,15	11,15

Tab. 3: Přehled průřezů a úbytků pro 2. variantu

8.1.3. Varianta 3

Paprsky A-G budou shodné s předchozí variantou.

Větev 1-G(HIKLM) bez odběru v G



Největší proudový moment je u větve 1-G-K-M

$$\frac{1}{\sigma_{1GKM}} = \frac{\rho \cdot \cos \varphi \cdot (l_{1G} + l_{GK} + l_{KM})}{\Delta U - X_K \cdot 10^{-3} \cdot \sin \varphi \cdot (l_{1G} \cdot I_{1G} + l_{GK} \cdot I_{GK} + l_{KM} \cdot I_{KM})} =$$

$$= \frac{0,95 \cdot (775 + 681 + 205)}{57 \left(11,5 - 0,08 \cdot 10^{-3} \cdot 0,31 \cdot \left(775 \cdot \frac{266}{4} + 681 \cdot \frac{166}{3} + 205 \cdot 63 \right) \right)} = 3,09 \text{ mm}^2 \cdot \text{A}^{-1}$$

$$S_{1G} = I_{GK} \cdot \frac{1}{\sigma_{1GKM}} = 266 \cdot 3,09 = 822,9 \text{ mm}^2 \rightarrow 4 \times 240 \text{ mm}^2$$

$$S_{GK} = I_{GK} \cdot \frac{1}{\sigma_{1GKM}} = 166 \cdot 3,09 = 513,5 \text{ mm}^2 \rightarrow 3 \times 185 \text{ mm}^2$$

$$S_{KM} = I_{KM} \cdot \frac{1}{\sigma_{1GKM}} = 63 \cdot 3,09 = 194,9 \text{ mm}^2 \rightarrow 185 \text{ mm}^2$$

$$\begin{aligned} \Delta U_G &= \frac{\rho \cdot l_{1G}}{S_{1G}} \cdot I_{1G} \cdot \cos \varphi + X_K \cdot 10^{-3} \cdot I_{1G} \cdot l_{1G} \cdot \sin \varphi = \\ &= \frac{951}{57 \cdot 4 \cdot 240} \cdot 266 \cdot 0,95 + \frac{0,0785}{4} \cdot 10^{-3} \cdot 266 \cdot 951 \cdot 0,31 = 4,84 \text{ V} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta U_K &= \Delta U_G + \frac{l_{GK}}{S_{GK}} \cdot I_{GK} \cdot \cos \varphi + X_K \cdot 10^{-3} \cdot I_{GK} \cdot l_{GK} \cdot \sin \varphi = \\ &= 4,84 + \frac{681}{57 \cdot 3 \cdot 185} \cdot 166 \cdot 0,95 + \frac{0,0785}{3} \cdot 10^{-3} \cdot 166 \cdot 681 \cdot 0,31 = 9,16 \text{ V} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta U_M &= \Delta U_K + \frac{l_{KM}}{S_{KM}} \cdot I_{KM} \cdot \cos \varphi + X_K \cdot 10^{-3} \cdot I_{KM} \cdot l_{KM} \cdot \sin \varphi = \\ &= 9,16 + \frac{205}{57 \cdot 185} \cdot 63 \cdot 0,95 + 0,0785 \cdot 10^{-3} \cdot 63 \cdot 205 \cdot 0,31 = 10,64 \text{ V} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S_{GH} &= \frac{\rho \cdot l_{GH} \cdot I_{GH} \cdot \cos \varphi}{(\Delta U - \Delta U_G) - X_K \cdot 10^{-3} \cdot l_{GH} \cdot I_{GH} \cdot \sin \varphi} = \frac{488 \cdot 60 \cdot 0,95}{57 \cdot (6,66 - 0,08 \cdot 10^{-3} \cdot 488 \cdot 60 \cdot 0,31)} = \\ &= 82,4 \text{ mm}^2 \rightarrow 95 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta U_H &= \Delta U_G + \frac{l_{GH}}{S_{GH}} \cdot I_{GH} \cdot \cos \varphi + X_K \cdot 10^{-3} \cdot I_{GH} \cdot l_{GH} \cdot \sin \varphi = \\ &= 4,84 + \frac{488}{57 \cdot 95} \cdot 60 \cdot 0,95 + 0,0817 \cdot 10^{-3} \cdot 60 \cdot 488 \cdot 0,31 = 10,73 \text{ V} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S_{GI} &= \frac{\rho \cdot l_{GI} \cdot I_{GI} \cdot \cos \varphi}{(\Delta U - \Delta U_G) - X_K \cdot 10^{-3} \cdot l_{GI} \cdot I_{GI} \cdot \sin \varphi} = \frac{443 \cdot 40 \cdot 0,95}{57 \cdot (6,66 - 0,08 \cdot 10^{-3} \cdot 443 \cdot 40 \cdot 0,31)} = \\ &= 47,5 \text{ mm}^2 \rightarrow 50 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta U_I &= \Delta U_G + \frac{l_{GI}}{S_{GI}} \cdot I_{GI} \cdot \cos \varphi + X_K \cdot 10^{-3} \cdot I_{GI} \cdot l_{GI} \cdot \sin \varphi = \\ &= 4,84 + \frac{443}{57 \cdot 50} \cdot 40 \cdot 0,95 + 0,0848 \cdot 10^{-3} \cdot 40 \cdot 443 \cdot 0,31 = 11,22 \text{ V} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S_{KL} &= \frac{\rho \cdot l_{KL} \cdot I_{KL} \cdot \cos \varphi}{(\Delta U - \Delta U_K) - X_K \cdot 10^{-3} \cdot l_{KL} \cdot I_{KL} \cdot \sin \varphi} = \frac{277 \cdot 40 \cdot 0,95}{57 \cdot (2,34 - 0,08 \cdot 10^{-3} \cdot 277 \cdot 40 \cdot 0,31)} = \\ &= 89,6 \text{ mm}^2 \rightarrow 95 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

$$\Delta U_L = \Delta U_K + \frac{l_{KL}}{S_{KL}} \cdot I_{KL} \cdot \cos \varphi + X_K \cdot 10^{-3} \cdot I_{KL} \cdot l_{KL} \cdot \sin \varphi =$$

$$= 9,16 + \frac{277}{57 \cdot 95} \cdot 40 \cdot 0,95 + 0,0818 \cdot 10^{-3} \cdot 40 \cdot 277 \cdot 0,31 = 11,39 \text{ V}$$

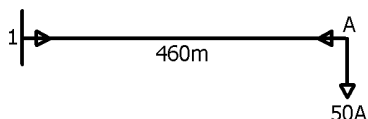
Úsek	Délka (m)	Proud (A)	Průřez (mm ²)	Úbytek na úseku (V)	Celkový úbytek v místě odběru (V)
1A	460	50	50	8,28	8,28
1B	627	140	240	8,25	8,25
BC	343	40	95	2,76	11,01
BD	307	60	120	3,01	11,26
1E	951	126	2x120	9,79	9,79
EF	110	63	120	11,13	10,92
1G	775	40	50	11,15	11,15
1G-K	775	266	4x240	4,84	4,84
GH	488	60	95	5,88	10,73
GI	443	40	70	6,38	11,22
GK	681	166	3x185	4,32	9,16
KL	277	40	150	2,23	11,39
KM	205	63	185	1,48	10,64

Tab. 4: Přehled průřezů a úbytků pro 3. variantu

8.1.4. Varianta 4, 5 a 6

Konfigurace jednotlivých větví navržených z kabelů 1-AYKY bude shodná pro všechny 3 varianty (varianty se budou lišit pouze časem a rozsahem výstavby)

Větev 1-A

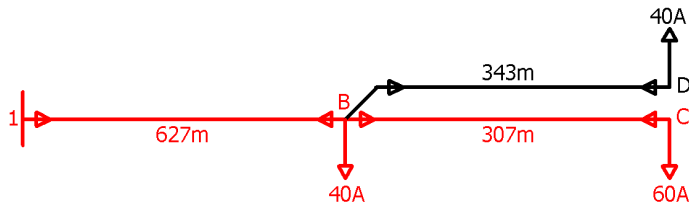


$$S_{1A} = \frac{\rho \cdot l_{1A} \cdot I_{1A} \cdot \cos \varphi}{\Delta U - X_K \cdot 10^{-3} \cdot l_{1A} \cdot I_{1A} \cdot \sin \varphi} = \frac{460 \cdot 50 \cdot 0,95}{33 \cdot (11,5 - 0,08 \cdot 10^{-3} \cdot 460 \cdot 50 \cdot 0,31)} =$$

$$= 60,6 \text{ mm}^2 \rightarrow 70 \text{ mm}^2$$

$$\Delta U_A = \frac{\rho \cdot l_{1A}}{S_{1A}} \cdot I_{1A} \cdot \cos \varphi + X_K \cdot 10^{-3} \cdot I_{1A} \cdot l_{1A} \cdot \sin \varphi =$$

$$= \frac{460}{33 \cdot 70} \cdot 50 \cdot 0,95 + 0,0817 \cdot 10^{-3} \cdot 50 \cdot 460 \cdot 0,31 = 10,05 \text{ V}$$

Větev 1-B(CD)

Větší proudový moment je u větve 1-B-D

$$\frac{1}{\sigma_{1BD}} = \frac{\rho \cdot \cos \varphi \cdot (l_{1B} + l_{BD})}{\Delta U - X_K \cdot 10^{-3} \cdot \sin \varphi \cdot (l_{1B} \cdot I_{1B} + l_{BD} \cdot I_{BD})} =$$

$$= \frac{0,95 \cdot (627 + 307)}{33 \left(11,5 - 0,08 \cdot 10^{-3} \cdot 0,31 \cdot \left(627 \cdot \frac{140}{2} + 307 \cdot 60 \right) \right)} = 2,70 \text{ mm}^2 \cdot \text{A}^{-1}$$

$$S_{1B} = I_{1B} \cdot \frac{1}{\sigma_{1BD}} = 140 \cdot 2,70 = 378,6 \text{ mm}^2 \rightarrow 2 \times 185 \text{ mm}^2$$

$$S_{BD} = I_{BD} \cdot \frac{1}{\sigma_{1BD}} = 60 \cdot 2,70 = 162,2 \text{ mm}^2 \rightarrow 185 \text{ mm}^2$$

$$\Delta U_B = \frac{\rho \cdot l_{1B}}{S_{1B}} \cdot I_{1B} \cdot \cos \varphi + X_K \cdot 10^{-3} \cdot I_{1B} \cdot l_{1B} \cdot \sin \varphi =$$

$$= \frac{627}{33 \cdot 2 \cdot 185} \cdot 140 \cdot 0,95 + \frac{0,0785}{2} \cdot 10^{-3} \cdot 140 \cdot 627 \cdot 0,31 = 7,91 \text{ V}$$

$$\Delta U_D = \Delta U_B + \frac{307}{S_{BD}} \cdot I_{BD} \cdot \cos \varphi + X_K \cdot 10^{-3} \cdot I_{BD} \cdot l_{BD} \cdot \sin \varphi =$$

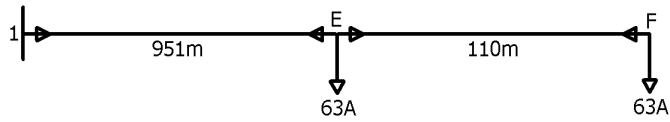
$$= 7,97 + \frac{307}{33 \cdot 185} \cdot 60 \cdot 0,95 + 0,0785 \cdot 10^{-3} \cdot 60 \cdot 307 \cdot 0,31 = 11,22 \text{ V}$$

$$S_{BC} = \frac{\rho \cdot l_{BC} \cdot I_{BC} \cdot \cos \varphi}{(\Delta U - \Delta U_B) - X_K \cdot 10^{-3} \cdot l_{BC} \cdot I_{BC} \cdot \sin \varphi} = \frac{343 \cdot 50 \cdot 0,95}{33 \cdot (3,6 - 0,08 \cdot 10^{-3} \cdot 343 \cdot 50 \cdot 0,31)} =$$

$$= 121,5 \text{ mm}^2 \rightarrow 150 \text{ mm}^2$$

$$\Delta U_C = \Delta U_B + \frac{l_{CD}}{S_{CD}} \cdot I_{CD} \cdot \cos \varphi + X_K \cdot 10^{-3} \cdot I_{CD} \cdot l_{CD} \cdot \sin \varphi =$$

$$= 7,91 + \frac{343}{33 \cdot 95} \cdot 40 \cdot 0,95 + 0,0785 \cdot 10^{-3} \cdot 40 \cdot 343 \cdot 0,31 = 10,88 \text{ V}$$

Větev 1-E(F)

$$\frac{1}{\sigma_{1EF}} = \frac{\rho \cdot \cos \varphi \cdot (l_{1E} + l_{EF})}{\Delta U - X_K \cdot 10^{-3} \cdot \sin \varphi \cdot (l_{1E} \cdot I_{1E} + l_{EF} \cdot I_{EF})} =$$

$$= \frac{0,95 \cdot (951 + 110)}{33 \left(11,5 - 0,08 \cdot 10^{-3} \cdot 0,31 \cdot \left(951 \cdot \frac{126}{2} + 110 \cdot 63 \right) \right)} = 3,11 \text{ mm}^2 \cdot \text{A}^{-1}$$

$$S_{1E} = I_{1E} \cdot \frac{1}{\sigma_{1EF}} = 126 \cdot 3,11 = 391,5 \text{ mm}^2 \rightarrow 2 \times 240 \text{ mm}^2$$

$$S_{EF} = I_{EF} \cdot \frac{1}{\sigma_{1EF}} = 63 \cdot 3,11 = 195,7 \text{ mm}^2 \rightarrow 120 \text{ mm}^2$$

$$\Delta U_E = \frac{\rho \cdot l_{1E}}{S_{1E}} \cdot I_{1E} \cdot \cos \varphi + X_K \cdot 10^{-3} \cdot I_{1E} \cdot l_{1E} \cdot \sin \varphi =$$

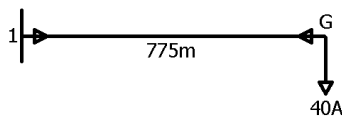
$$= \frac{951}{33 \cdot 2 \cdot 240} \cdot 126 \cdot 0,95 + \frac{0,0785}{2} \cdot 10^{-3} \cdot 126 \cdot 951 \cdot 0,31 = 8,66 \text{ V}$$

$$S_{EF} = \frac{\rho \cdot l_{EF} \cdot I_{EF} \cdot \cos \varphi}{(\Delta U - \Delta U_E) - X_K \cdot 10^{-3} \cdot l_{EF} \cdot I_{EF} \cdot \sin \varphi} = \frac{110 \cdot 63 \cdot 0,95}{33 \cdot (2,84 - 0,08 \cdot 10^{-3} \cdot 110 \cdot 63 \cdot 0,31)} =$$

$$= 74,7 \text{ mm}^2 \rightarrow 95 \text{ mm}^2$$

$$\Delta U_F = \Delta U_E + \frac{l_{EF}}{S_{EF}} \cdot I_{EF} \cdot \cos \varphi + X_K \cdot 10^{-3} \cdot I_{EF} \cdot l_{EF} \cdot \sin \varphi =$$

$$= 8,66 + \frac{110}{33 \cdot 95} \cdot 63 \cdot 0,95 + 0,0817 \cdot 10^{-3} \cdot 63 \cdot 110 \cdot 0,31 = 10,93 \text{ V}$$

Větev 1-G

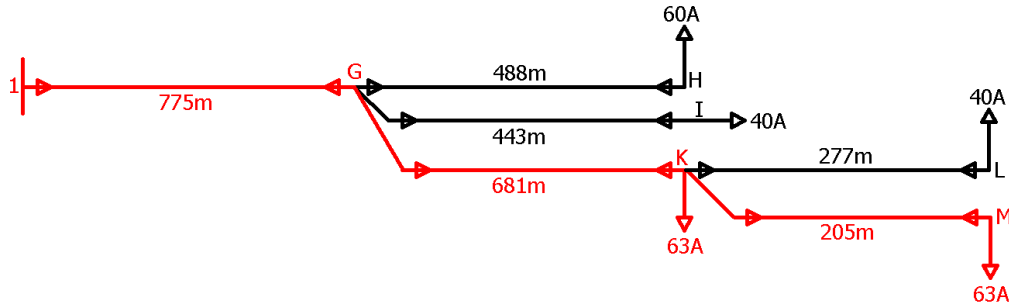
$$S_{1A} = \frac{\rho \cdot l_{1G} \cdot I_{1G} \cdot \cos \varphi}{\Delta U - X_K \cdot 10^{-3} \cdot l_{1G} \cdot I_{1G} \cdot \sin \varphi} = \frac{775 \cdot 40 \cdot 0,95}{33 \cdot (11,5 - 0,08 \cdot 10^{-3} \cdot 775 \cdot 40 \cdot 0,31)} =$$

$$= 83,2 \text{ mm}^2 \rightarrow 95 \text{ mm}^2$$

$$\Delta U_G = \frac{\rho \cdot l_{1G}}{S_{1G}} \cdot I_{1G} \cdot \cos \varphi + X_K \cdot 10^{-3} \cdot I_{1G} \cdot l_{1G} \cdot \sin \varphi =$$

$$= \frac{775}{33 \cdot 95} \cdot 40 \cdot 0,95 + 0,0848 \cdot 10^{-3} \cdot 40 \cdot 775 \cdot 0,31 = 10,18 \text{ V}$$

Větev 1G(HIKLM) bez odběru G



$$\frac{1}{\sigma_{1GKM}} = \frac{\rho \cdot \cos \varphi \cdot (l_{1G} + l_{GK} + l_{KM})}{\Delta U - X_K \cdot 10^{-3} \cdot \sin \varphi \cdot (l_{1G} \cdot I_{1G} + l_{GK} \cdot I_{GK} + l_{KM} \cdot I_{KM})} =$$

$$= \frac{0,95 \cdot (775 + 681 + 205)}{33 \left(11,5 - 0,08 \cdot 10^{-3} \cdot 0,31 \cdot \left(775 \cdot \frac{266}{6} + 681 \cdot \frac{166}{4} + 205 \cdot 63 \right) \right)} = 4,97 \text{ mm}^2 \cdot \text{A}^{-1}$$

$$S_{1G} = I_{GK} \cdot \frac{1}{\sigma_{1GKM}} = 266 \cdot 4,97 = 1323,1 \text{ mm}^2 \rightarrow 6 \times 240 \text{ mm}^2$$

$$S_{GK} = I_{GK} \cdot \frac{1}{\sigma_{1GKM}} = 166 \cdot 4,97 = 825,7 \text{ mm}^2 \rightarrow 4 \times 240 \text{ mm}^2$$

$$S_{KM} = I_{KM} \cdot \frac{1}{\sigma_{1GKM}} = 63 \cdot 4,97 = 174,5 \text{ mm}^2 \rightarrow 185 \text{ mm}^2$$

$$\Delta U_G = \frac{\rho \cdot l_{1G}}{S_{1G}} \cdot I_{1G} \cdot \cos \varphi + X_K \cdot 10^{-3} \cdot I_{1G} \cdot l_{1G} \cdot \sin \varphi =$$

$$= \frac{951}{33 \cdot 6 \cdot 240} \cdot 266 \cdot 0,95 + \frac{0,0785}{6} \cdot 10^{-3} \cdot 266 \cdot 951 \cdot 0,31 = 4,96 \text{ V}$$

$$\Delta U_K = \Delta U_G + \frac{l_{GK}}{S_{GK}} \cdot I_{GK} \cdot \cos \varphi + X_K \cdot 10^{-3} \cdot I_{GK} \cdot l_{GK} \cdot \sin \varphi =$$

$$= 4,96 + \frac{681}{33 \cdot 4 \cdot 240} \cdot 166 \cdot 0,95 + \frac{0,0785}{4} \cdot 10^{-3} \cdot 166 \cdot 681 \cdot 0,31 = 9,05 \text{ V}$$

$$\Delta U_M = \Delta U_K + \frac{l_{KM}}{S_{KM}} \cdot I_{KM} \cdot \cos \varphi + X_K \cdot 10^{-3} \cdot I_{KM} \cdot l_{KM} \cdot \sin \varphi =$$

$$= 9,05 + \frac{205}{33 \cdot 185} \cdot 63 \cdot 0,95 + 0,0785 \cdot 10^{-3} \cdot 63 \cdot 205 \cdot 0,31 = 11,37 \text{ V}$$

$$S_{GH} = \frac{\rho \cdot l_{GH} \cdot I_{GH} \cdot \cos \varphi}{(\Delta U - \Delta U_G) - X_K \cdot 10^{-3} \cdot l_{GH} \cdot I_{GH} \cdot \sin \varphi} = \frac{488 \cdot 60 \cdot 0,95}{33 \cdot (6,54 - 0,08 \cdot 10^{-3} \cdot 488 \cdot 60 \cdot 0,3)} =$$

$$= 145,2 \text{ mm}^2 \rightarrow 150 \text{ mm}^2$$

$$\Delta U_H = \Delta U_G + \frac{l_{GH}}{S_{GH}} \cdot I_{GH} \cdot \cos \varphi + X_K \cdot 10^{-3} \cdot I_{GH} \cdot l_{GH} \cdot \sin \varphi =$$

$$= 4,96 + \frac{488}{33 \cdot 150} \cdot 60 \cdot 0,95 + 0,0785 \cdot 10^{-3} \cdot 60 \cdot 488 \cdot 0,31 = 11,30 \text{ V}$$

$$S_{GI} = \frac{\rho \cdot l_{GI} \cdot I_{GI} \cdot \cos \varphi}{(\Delta U - \Delta U_G) - X_K \cdot 10^{-3} \cdot l_{GI} \cdot I_{GI} \cdot \sin \varphi} = \frac{443 \cdot 40 \cdot 0,95}{33 \cdot (6,54 - 0,08 \cdot 10^{-3} \cdot 443 \cdot 40 \cdot 0,31)} =$$

$$= 83,7 \text{ mm}^2 \rightarrow 95 \text{ mm}^2$$

$$\Delta U_I = \Delta U_G + \frac{l_{GI}}{S_{GI}} \cdot I_{GI} \cdot \cos \varphi + X_K \cdot 10^{-3} \cdot I_{GI} \cdot l_{GI} \cdot \sin \varphi =$$

$$= 4,96 + \frac{443}{57 \cdot 95} \cdot 40 \cdot 0,95 + 0,0817 \cdot 10^{-3} \cdot 40 \cdot 443 \cdot 0,31 = 10,79 \text{ V}$$

$$S_{KL} = \frac{\rho \cdot l_{KL} \cdot I_{KL} \cdot \cos \varphi}{(\Delta U - \Delta U_K) - X_K \cdot 10^{-3} \cdot l_{KL} \cdot I_{KL} \cdot \sin \varphi} = \frac{277 \cdot 40 \cdot 0,95}{33 \cdot (2,45 - 0,08 \cdot 10^{-3} \cdot 277 \cdot 40 \cdot 0,31)} =$$

$$= 146,6 \text{ mm}^2 \rightarrow 150 \text{ mm}^2$$

$$\Delta U_L = \Delta U_K + \frac{l_{KL}}{S_{KL}} \cdot I_{KL} \cdot \cos \varphi + X_K \cdot 10^{-3} \cdot I_{KL} \cdot l_{KL} \cdot \sin \varphi =$$

$$= 9,05 + \frac{277}{33 \cdot 150} \cdot 40 \cdot 0,95 + 0,0785 \cdot 10^{-3} \cdot 40 \cdot 277 \cdot 0,31 = 11,45 \text{ V}$$

Úsek	Délka (m)	Proud (A)	Průřez (mm ²)	Úbytek na úseku (V)	Celkový úbytek v místě odběru (V)
1A	460	50	70	10,05	10,05
1B	627	140	2x185	7,91	7,91
BC	343	40	150	2,97	10,88
BD	307	60	185	3,32	11,22
1E	951	126	2x240	8,66	8,66
EF	110	63	95	2,28	10,93
1G	775	40	95	10,18	10,18
1G-K	775	266	6x240	4,96	4,96
GH	488	60	150	6,34	11,30
GI	443	40	95	5,82	10,79
GK	681	166	4x240	4,08	9,05
KL	277	40	150	2,40	11,45
KM	205	63	185	2,33	11,37

Tab. 5: Přehled průřezů a úbytků pro varianty 4, 5 a 6

8.2. Parametry kabelů

Pro další výpočty s kabely jsou použity tyto parametry:

	Měď (kabely 1-CYKY)		Hliník (kabely 1-AYKY)	
Počet žil x Průřez jader ($n \times \text{mm}^2$)	Činný odpor R_K (Ω/km)	Reaktance X_K (Ω/km)	Činný odpor R_K (Ω/km)	Reaktance X_K (Ω/km)
4x50	0,351	0,0848		
4x70	0,251	0,0817	0,433	0,0817
4x95	0,185	0,0817	0,319	0,0817
4x120	0,146	0,0785	0,253	0,0785
4x150	0,117	0,0785	0,202	0,0785
4x185	0,095	0,0785	0,164	0,0785
4x240	0,073	0,0785	0,126	0,0785

Tab. 6: Parametry použitých kabelů

9. Výpočet zkratových proudů

Při výpočtu postupuji podle normy ČSN EN 60909, která je založena na metodě ekvivalentního napěťového zdroje, jenž je jediným zdrojem napětí v soustavě.

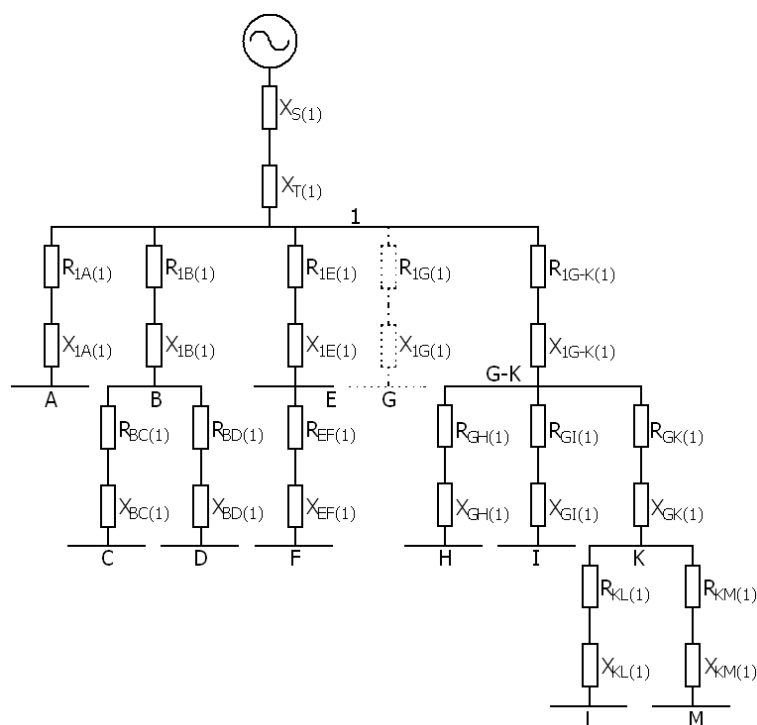
Vzhledem k tomu, že celá síť je na stejné napěťové hladině, bude výpočet prvků soustavy proveden ve fyzikálních jednotkách.

Dále bude uvažováno u všech prvků $Z_{(1)} = Z_{(2)}$, $Z_{V(0)} = 3 \cdot Z_{V(1)}$, $Z_{T(0)} = 0,85 \cdot Z_{T(1)}$

9.1. Parametry prvků pro výpočet maximálních zkratových proudů

Maximální zkratové proudy

- musí se použít napěťový součinitel c_{max}
- vybrat konfiguraci soustavy a maximální příspěvky z elektráren a síťových napáječů tak, aby vedly k maximální hodnotě zkratového proudu v místě zkratu
- dosazují se rezistence venkovních vedení a kabelů při teplotě 20°C



Obr. 21: Schéma celé sítě

9.1.1. Výpočet parametrů prvků soustavy společných pro všechny varianty

Síťový napáječ

$$X'_{S(1)} = \frac{c_{max} \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot I''_{k3}} = \frac{c_{max} \cdot U_n^2}{S''_{kmax}} = \frac{1,1 \cdot 22^2}{250} = 2,1296 \, \Omega$$

Přepočet na napěťovou hladinu 400V

$$X_{S(1)} = X'_{S(1)} \cdot \left(\frac{U_1}{U_2}\right)^2 = 1,2295 \cdot \left(\frac{0,4}{22}\right)^2 = 0,704 \text{ m}\Omega$$

Transformátor

Lze uvažovat $R_{(1)} \approx 0 \rightarrow Z_{(1)} = X_{(1)}$

$$X_{T(1)} = \frac{u_k}{100} \cdot \frac{U_n}{S_T} = \frac{6}{100} \cdot \frac{0,4}{2 \cdot 2,5} = 4,8 \text{ m}\Omega$$

9.1.2. Výpočet parametrů prvků soustavy pro variantu 1 a 2

Vedení 1B $R_{1B_Cu} = R_{k240} \cdot l_{1B} = 0,073 \cdot 0,627 = 45,83 \text{ m}\Omega$

$$X_{1B_Cu} = X_{k240} \cdot l_{1B} = 0,0785 \cdot 0,627 = 49,24 \text{ m}\Omega$$

Vedení 1E $R_{1E_Cu} = \frac{R_{k120} \cdot l_{1E}}{2} = \frac{0,146 \cdot 0,951}{2} = 69,52 \text{ m}\Omega$

$$X_{1E_Cu} = \frac{X_{k120} \cdot l_{1E}}{2} = \frac{0,0785 \cdot 0,951}{2} = 37,35 \text{ m}\Omega$$

Vedení 1G+K $R_{1G+K_Cu} = \frac{R_{k240} \cdot l_{1G}}{4} = \frac{0,073 \cdot 0,775}{4} = 14,16 \text{ m}\Omega$

$$X_{1G+K_Cu} = \frac{X_{k240} \cdot l_{1G}}{4} = \frac{0,0785 \cdot 0,775}{4} = 15,22 \text{ m}\Omega$$

Vedení GK $R_{GK_Cu} = \frac{R_{k185} \cdot l_{GK}}{3} = \frac{0,095 \cdot 0,681}{3} = 21,53 \text{ m}\Omega$

$$X_{GK_Cu} = \frac{X_{k185} \cdot l_{GK}}{3} = \frac{0,0785 \cdot 0,681}{3} = 17,83 \text{ m}\Omega$$

9.1.3. Výpočet parametrů prvků soustavy pro variantu 3

Vedení 1G+K $R_{1G+K_Cu} = \frac{R_{k240} \cdot l_{1G}}{4} = \frac{0,073 \cdot 0,775}{4} = 14,16 \text{ m}\Omega$

$$X_{1G+K_Cu} = \frac{X_{k240} \cdot l_{1G}}{4} = \frac{0,0785 \cdot 0,775}{4} = 15,22 \text{ m}\Omega$$

Vedení GK $R_{GK_Cu} = \frac{R_{k185} \cdot l_{GK}}{3} = \frac{0,095 \cdot 0,681}{3} = 21,53 \text{ m}\Omega$

$$X_{GK_Cu} = \frac{X_{k185} \cdot l_{GK}}{3} = \frac{0,0785 \cdot 0,681}{3} = 17,83 \text{ m}\Omega$$

9.1.4. Výpočet parametrů prvků soustavy pro variantu 4, 5 a 6

Vedení 1B $R_{1B_Al} = \frac{R_{k185} \cdot l_{1B}}{2} = \frac{0,164 \cdot 0,627}{2} = 51,35 \text{ m}\Omega$

$$X_{1B_Al} = \frac{X_{k185} \cdot l_{1B}}{2} = \frac{0,0785 \cdot 0,627}{2} = 24,62 \text{ m}\Omega$$

Vedení 1E $R_{1E_Al} = \frac{R_{k240} \cdot l_{1E}}{2} = \frac{0,126 \cdot 0,951}{2} = 60,04 \text{ m}\Omega$

$$X_{1E_Al} = \frac{X_{k240} \cdot l_{1E}}{2} = \frac{0,0785 \cdot 0,951}{2} = 37,35 \text{ m}\Omega$$

Vedení 1G-K $R_{1G-K_Al} = \frac{R_{k240} \cdot l_{1G}}{6} = \frac{0,126 \cdot 0,775}{6} = 16,31 \text{ m}\Omega$

$$X_{1G-K_Al} = \frac{X_{k240} \cdot l_{1G}}{6} = \frac{0,0785 \cdot 0,775}{6} = 10,14 \text{ m}\Omega$$

Vedení GK $R_{GK_Al} = \frac{R_{k240} \cdot l_{GK}}{4} = \frac{0,126 \cdot 0,681}{4} = 21,50 \text{ m}\Omega$

$$X_{GK_Al} = \frac{X_{k240} \cdot l_{GK}}{4} = \frac{0,0785 \cdot 0,681}{4} = 13,37 \text{ m}\Omega$$

9.2. Výpočet maximálních zkratových proudů

Maximální proud bude u třífázového zkratu.

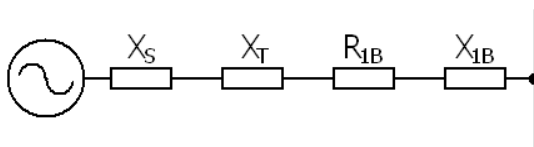
9.2.1. Společné pro všechny varianty

$$Z_{1(1)} = X_{S(1)} + X_{T(1)} = 0,704 + 4,8 = 5,504 \text{ m}\Omega$$

$$I''_{k3-1} = \frac{c_{max} \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot Z_{1(1)}} = \frac{1,1 \cdot 0,4}{\sqrt{3} \cdot 5,504 \cdot 10^{-3}} = 46,15 \text{ kA}$$

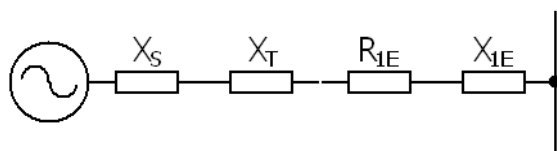
9.2.2. Pro varianty 1 a 2

Místo B



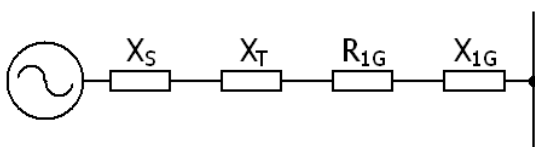
$$Z_{1B(1)} = \sqrt{R_{1B}^2 + (X_{1B} + X_{S(1)} + X_{T(1)})^2} = \sqrt{45,83^2 + (49,24 + 0,704 + 4,8)^2} = 71,40 \text{ m}\Omega$$

$$I''_{k3-B} = \frac{c_{max} \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot Z_{1B(1)}} = \frac{0,95 \cdot 0,4}{\sqrt{3} \cdot 71,40 \cdot 10^{-3}} = 3,56 \text{ kA}$$

Místo E

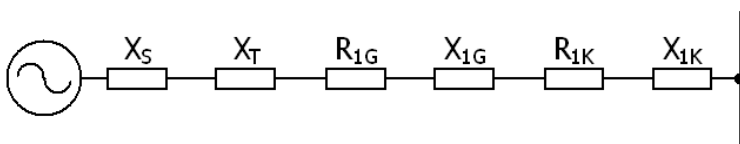
$$Z_{1E(1)} = 81,67 m\Omega$$

$$I''_{k3-E} = 3,11 kA$$

Místo G

$$Z_{1G+K(1)} = 25,1 m\Omega$$

$$I''_{k3-G} = 10,12 kA$$

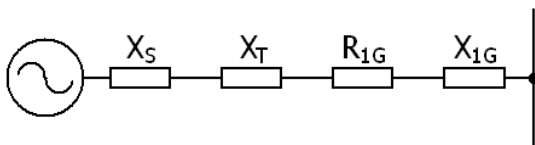
Místo K

$$Z_{1K(1)} = 52,53 m\Omega$$

$$I''_{k3-K} = 4,84 kA$$

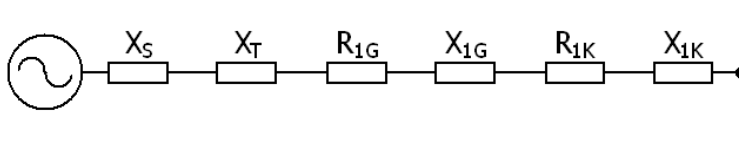
9.2.3. Pro variantu 3

Místa B a E stejné jako v 1. Variantě

Místo G

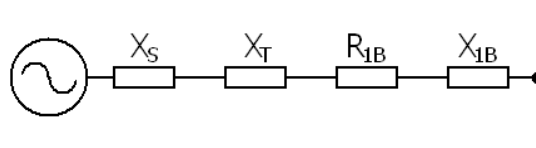
$$Z_{1G+K(1)} = 25,1 m\Omega$$

$$I''_{k3} = 10,12 kA$$

Místo K

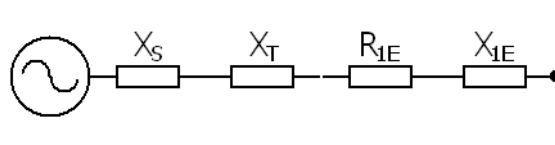
$$Z_{1K(1)} = 52,53 \text{ m}\Omega$$

$$I''_{k3} = 4,84 \text{ kA}$$

9.2.4. Pro variantu 4, 5 a 6**Místo B**

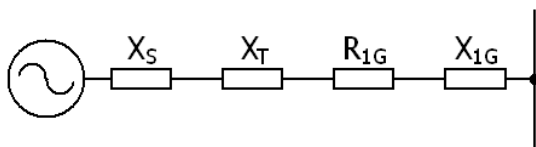
$$Z_{1B(1)} = 59,49 \text{ m}\Omega$$

$$I''_{k3} = 4,27 \text{ kA}$$

Místo E

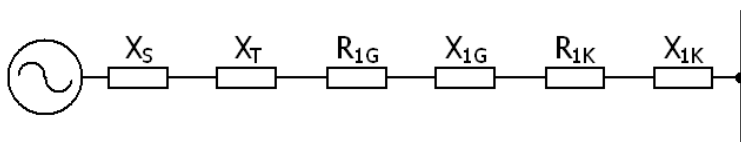
$$Z_{1E(1)} = 73,70 \text{ m}\Omega$$

$$I''_{k3} = 3,45 \text{ kA}$$

Místo G

$$Z_{1G(1)} = 22,54 \text{ m}\Omega$$

$$I''_{k3} = 11,27 \text{ kA}$$

Místo K

$$Z_{1K(1)} = 47,60 \text{ m}\Omega$$

$$I''_{k3} = 5,34 \text{ kA}$$

Místo	Třífázový počáteční zkratový proud (maximální) I''_{k3} (kA)		
	Varianta 1 a 2	Varianta 3	Varianta 4, 5 a 6
1	46,15	46,15	46,15
B	3,56	3,56	4,27
E	3,11	3,11	3,45
G	10,12		11,27
K	4,84		5,34

Tab. 7: Maximální zkratové proudy

9.3. Parametry prvků pro výpočet minimálních zkratových proudů

Minimální zkratové proudy

- musí se použít napěťový součinitel c_{\min}
- u více paralelních kabelů se uvažuje pouze jeden z nich
- dosazují se rezistence venkovních vedení, kabelů, vodičů a středních vodičů při nejvyšší teplotě

$$R = R_{20} \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta\theta) (\Omega)$$

Koeficient $\alpha = 4,0 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ (platí pro hliník i pro měď).

$\Delta\theta$ je rozdíl teplot – v tomto případě $\Delta\theta = (70 + 273,15) - (20 + 273,15) = 50 \text{ K}$

Měděné kabely (1-CYKY)

$$\text{Kabel } 50\text{mm}^2 \quad R_{Cu50} = R_{Cu50:20} \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta\theta) = 0,351 \cdot (1 + 4,0 \cdot 10^{-3} \cdot 50) = 0,421 \Omega \cdot \text{km}^{-1}$$

$$\text{Kabel } 70\text{mm}^2 \quad R_{Cu70} = R_{Cu70:20} \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta\theta) = 0,251 \cdot (1 + 4,0 \cdot 10^{-3} \cdot 50) = 0,301 \Omega \cdot \text{km}^{-1}$$

$$\text{Kabel } 95\text{mm}^2 \quad R_{Cu95} = R_{Cu95:20} \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta\theta) = 0,185 \cdot (1 + 4,0 \cdot 10^{-3} \cdot 50) = 0,222 \Omega \cdot \text{km}^{-1}$$

$$\text{Kabel } 120\text{mm}^2 \quad R_{Cu120} = R_{Cu120:20} \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta\theta) = 0,146 \cdot (1 + 4,0 \cdot 10^{-3} \cdot 50) = 0,175 \Omega \cdot \text{km}^{-1}$$

$$\text{Kabel } 150\text{mm}^2 \quad R_{Cu150} = R_{Cu150:20} \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta\vartheta) = 0,117 \cdot (1 + 4,0 \cdot 10^{-3} \cdot 50) = 0,140 \, \Omega \cdot \text{km}^{-1}$$

$$\text{Kabel } 185\text{mm}^2 \quad R_{Cu185} = R_{Cu185:20} \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta\vartheta) = 0,095 \cdot (1 + 4,0 \cdot 10^{-3} \cdot 50) = 0,114 \, \Omega \cdot \text{km}^{-1}$$

$$\text{Kabel } 240\text{mm}^2 \quad R_{Cu240} = R_{Cu240:20} \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta\vartheta) = 0,073 \cdot (1 + 4,0 \cdot 10^{-3} \cdot 50) = 0,088 \, \Omega \cdot \text{km}^{-1}$$

Hliníkové kabely (1-AYKY)

$$\text{Kabel } 70\text{mm}^2 \quad R_{Al70} = R_{Al70:20} \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta\vartheta) = 0,433 \cdot (1 + 4,0 \cdot 10^{-3} \cdot 50) = 0,519 \, \Omega \cdot \text{km}^{-1}$$

$$\text{Kabel } 95\text{mm}^2 \quad R_{Al95} = R_{Al95:20} \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta\vartheta) = 0,319 \cdot (1 + 4,0 \cdot 10^{-3} \cdot 50) = 0,383 \, \Omega \cdot \text{km}^{-1}$$

$$\text{Kabel } 120\text{mm}^2 \quad R_{Al120} = R_{Al120:20} \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta\vartheta) = 0,253 \cdot (1 + 4,0 \cdot 10^{-3} \cdot 50) = 0,303 \, \Omega \cdot \text{km}^{-1}$$

$$\text{Kabel } 150\text{mm}^2 \quad R_{Al150} = R_{Al150:20} \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta\vartheta) = 0,202 \cdot (1 + 4,0 \cdot 10^{-3} \cdot 50) = 0,242 \, \Omega \cdot \text{km}^{-1}$$

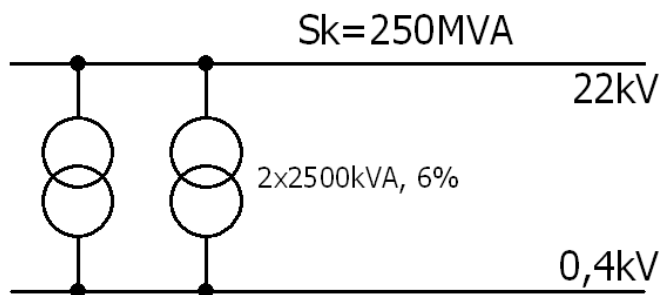
$$\text{Kabel } 185\text{mm}^2 \quad R_{Al185} = R_{Al185:20} \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta\vartheta) = 0,164 \cdot (1 + 4,0 \cdot 10^{-3} \cdot 50) = 0,197 \, \Omega \cdot \text{km}^{-1}$$

$$\text{Kabel } 240\text{mm}^2 \quad R_{Al240} = R_{Al240:20} \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta\vartheta) = 0,126 \cdot (1 + 4,0 \cdot 10^{-3} \cdot 50) = 0,152 \, \Omega \cdot \text{km}^{-1}$$

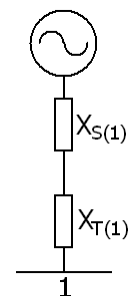
Počet žil x Průřez jader (n x mm ²)	Měď (kabely 1-CYKY)		Hliník (kabely 1-AYKY)	
	Činný odpor R _K (Ω/km)	Reaktance X _K (Ω/km)	Činný odpor R _K (Ω/km)	Reaktance X _K (Ω/km)
4x50	0,421	0,0848		
4x70	0,301	0,0817	0,519	0,0817
4x95	0,222	0,0817	0,383	0,0817
4x120	0,175	0,0785	0,303	0,0785
4x150	0,140	0,0785	0,242	0,0785
4x185	0,114	0,0785	0,197	0,0785
4x240	0,088	0,0785	0,152	0,0785

Tab. 8: Parametry použitých kabelů pro výpočet minimálních zkratových proudů (při 70°C)

9.3.1. Výpočet parametrů prvků soustavy společných pro všechny varianty



Obr. 22: Schéma společných prvků



Obr. 23: Náhradní schéma

Síťový napáječ

$$X'_{S(1)} = \frac{c_{min} \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot I''_{k3}} = \frac{c_{min} \cdot U_n^2}{S''_{kmax}} = \frac{0,95 \cdot 22^2}{250} = 1,84 \, \Omega$$

Přepočet na napěťovou hladinu 400V

$$X_{S(1)} = X'_{S(1)} \cdot \left(\frac{U_1}{U_2}\right)^2 = 1,84 \cdot \left(\frac{0,4}{22}\right)^2 = 0,608 \, m\Omega$$

Transformátor

Lze uvažovat $R_{(1)} \approx 0 \rightarrow Z_{(1)} = X_{(1)}$

$$X_{T(1)} = \frac{u_k}{100} \cdot \frac{U_n}{S_T} = \frac{6}{100} \cdot \frac{0,4}{2 \cdot 2,5} = 4,8 \, m\Omega$$

$$X_{T(0)} = 0,85 \cdot X_{T(1)} = 0,85 \cdot 4,8 = 4,08 \, m\Omega$$

9.3.2. Výpočet parametrů prvků soustavy pro variantu 1

Vedení 1A $R_{1A_Cu(1)} = R_{k50} \cdot l_{1A} = 0,421 \cdot 0,460 = 193,68 \, m\Omega$

$$X_{1A_Cu(1)} = X_{k50} \cdot l_{1A} = 0,0848 \cdot 0,460 = 39,02 \, m\Omega$$

Vedení 1B $R_{1B_Cu(1)} = R_{k240} \cdot l_{1B} = 0,088 \cdot 0,627 = 55 \, m\Omega$

$$X_{1B_Cu(1)} = X_{k240} \cdot l_{1B} = 0,0785 \cdot 0,627 = 49,24 \, m\Omega$$

Vedení BC $R_{BC_Cu(1)} = R_{k95} \cdot l_{BC} = 0,222 \cdot 0,343 = 76,01 \, m\Omega$

$$X_{BC_Cu(1)} = X_{k95} \cdot l_{BC} = 0,0817 \cdot 0,343 = 28,02 \, m\Omega$$

Vedení BD $R_{BD_Cu(1)} = R_{k120} \cdot l_{BD} = 0,175 \cdot 0,307 = 53,86 \, m\Omega$

$$X_{BD_Cu(1)} = X_{k120} \cdot l_{BD} = 0,0785 \cdot 0,307 = 24,11 \, m\Omega$$

Vedení 1E $R_{1E_Cu(1)} = R_{k120} \cdot l_{1E} = 0,175 \cdot 0,951 = 166,84 \, m\Omega$

$$X_{1E_Cu(1)} = X_{k120} \cdot l_{1E} = 0,0785 \cdot 0,951 = 74,69 \, m\Omega$$

Vedení EF $R_{EF_Cu(1)} = R_{k120} \cdot l_{EF} = 0,175 \cdot 0,110 = 19,30 \, m\Omega$

$$X_{EF_Cu(1)} = X_{k120} \cdot l_{EF} = 0,0785 \cdot 0,110 = 8,64 \, m\Omega$$

Vedení 1G+K $R_{1G+K_Cu(1)} = R_{k240} \cdot l_{1G} = 0,088 \cdot 0,775 = 67,98 \, m\Omega$

$$X_{1G+K_Cu(1)} = X_{k240} \cdot l_{1G} = 0,0785 \cdot 0,775 = 60,87 \, m\Omega$$

Vedení GH	$R_{GH_Cu(1)} = R_{k95} \cdot l_{GH} = 0,222 \cdot 0,488 = 108,14 \text{ m}\Omega$
	$X_{GH_Cu(1)} = X_{k95} \cdot l_{GH} = 0,0817 \cdot 0,488 = 39,86 \text{ m}\Omega$
Vedení GI	$R_{GI_Cu(1)} = R_{k70} \cdot l_{GI} = 0,301 \cdot 0,443 = 133,23 \text{ m}\Omega$
	$X_{GI_Cu(1)} = X_{k70} \cdot l_{GI} = 0,0817 \cdot 0,443 = 36,19 \text{ m}\Omega$
Vedení GK	$R_{GK_Cu(1)} = R_{k185} \cdot l_{GK} = 0,114 \cdot 0,681 = 77,50 \text{ m}\Omega$
	$X_{GK_Cu(1)} = X_{k185} \cdot l_{GK} = 0,0785 \cdot 0,681 = 53,49 \text{ m}\Omega$
Vedení KL	$R_{KL_Cu(1)} = R_{k150} \cdot l_{KL} = 0,140 \cdot 0,277 = 38,88 \text{ m}\Omega$
	$X_{KL_Cu(1)} = X_{k150} \cdot l_{KL} = 0,0785 \cdot 0,277 = 21,76 \text{ m}\Omega$
Vedení KM	$R_{KM_Cu(1)} = R_{k185} \cdot l_{KM} = 0,114 \cdot 0,205 = 23,33 \text{ m}\Omega$
	$X_{KM_Cu(1)} = X_{k185} \cdot l_{KM} = 0,0785 \cdot 0,205 = 16,10 \text{ m}\Omega$

9.3.3. Výpočet parametrů prvků soustavy pro variantu 2

Parametry vedení 1A, 1B, BD, BD, 1E a EF jsou shodné s předchozí variantou

Vedení 1G	$R_{1G_Cu(1)} = R_{k50} \cdot l_{1G} = 0,421 \cdot 0,775 = 326,32 \text{ m}\Omega$
	$X_{1G_Cu(1)} = X_{k50} \cdot l_{1G} = 0,0848 \cdot 0,775 = 65,74 \text{ m}\Omega$

9.3.4. Výpočet parametrů prvků soustavy pro variantu 3

Parametry vedení 1A, 1B, BD, BD, 1E, EF a 1G jsou shodné s předchozími variantami.

Vedení 1G-K	$R_{1G-K_Cu(1)} = R_{k240} \cdot l_{1G} = 0,088 \cdot 0,775 = 67,98 \text{ m}\Omega$
	$X_{1G-K_Cu(1)} = X_{k240} \cdot l_{1G} = 0,0785 \cdot 0,775 = 60,87 \text{ m}\Omega$
Vedení GH	$R_{GH_Cu(1)} = R_{k95} \cdot l_{GH} = 0,222 \cdot 0,488 = 10,81 \text{ m}\Omega$
	$X_{GH_Cu(1)} = X_{k95} \cdot l_{GH} = 0,0817 \cdot 0,488 = 39,86 \text{ m}\Omega$
Vedení GI	$R_{GI_Cu(1)} = R_{k50} \cdot l_{GI} = 0,421 \cdot 0,443 = 186,53 \text{ m}\Omega$
	$X_{GI_Cu(1)} = X_{k50} \cdot l_{GI} = 0,0848 \cdot 0,443 = 37,58 \text{ m}\Omega$
Vedení GK	$R_{GK_Cu(1)} = R_{k185} \cdot l_{GK} = 0,114 \cdot 0,681 = 77,50 \text{ m}\Omega$
	$X_{GK_Cu(1)} = X_{k185} \cdot l_{GK} = 0,0785 \cdot 0,681 = 53,49 \text{ m}\Omega$

Vedení KL	$R_{KL_Cu(1)} = R_{k95} \cdot l_{KL} = 0,222 \cdot 0,277 = 61,39 \text{ m}\Omega$
	$X_{KL_Cu(1)} = X_{k95} \cdot l_{KL} = 0,0817 \cdot 0,277 = 22,63 \text{ m}\Omega$
Vedení KM	$R_{KM_Cu(1)} = R_{k185} \cdot l_{KM} = 0,114 \cdot 0,205 = 23,33 \text{ m}\Omega$
	$X_{KM_Cu(1)} = X_{k185} \cdot l_{KM} = 0,0785 \cdot 0,205 = 16,10 \text{ m}\Omega$

9.3.5. Výpočet parametrů prvků soustavy pro variantu 4, 5 a 6

Vedení 1A	$R_{1A_Al(1)} = R_{k70} \cdot l_{1A} = 0,519 \cdot 0,460 = 238,96 \text{ m}\Omega$
	$X_{1A_Al(1)} = X_{k70} \cdot l_{1A} = 0,0817 \cdot 0,460 = 37,57 \text{ m}\Omega$
Vedení 1B	$R_{1B_Al(1)} = R_{k185} \cdot l_{1B} = 0,197 \cdot 0,627 = 123,24 \text{ m}\Omega$
	$X_{1B_Al(1)} = X_{k185} \cdot l_{1B} = 0,0785 \cdot 0,627 = 49,24 \text{ m}\Omega$
Vedení BC	$R_{BC_Al(1)} = R_{k150} \cdot l_{BC} = 0,242 \cdot 0,343 = 83,15 \text{ m}\Omega$
	$X_{BC_Al(1)} = X_{k150} \cdot l_{BC} = 0,0785 \cdot 0,343 = 26,94 \text{ m}\Omega$
Vedení BD	$R_{BD_Al(1)} = R_{k185} \cdot l_{BD} = 0,197 \cdot 0,307 = 60,34 \text{ m}\Omega$
	$X_{BD_Al(1)} = X_{k185} \cdot l_{BD} = 0,0785 \cdot 0,307 = 24,11 \text{ m}\Omega$
Vedení 1E	$R_{1E_Al(1)} = R_{k240} \cdot l_{1E} = 0,152 \cdot 0,951 = 144,09 \text{ m}\Omega$
	$X_{1E_Al(1)} = X_{k240} \cdot l_{1E} = 0,0785 \cdot 0,951 = 74,69 \text{ m}\Omega$
Vedení EF	$R_{EF_Al(1)} = R_{k95} \cdot l_{EF} = 0,383 \cdot 0,110 = 42,11 \text{ m}\Omega$
	$X_{EF_Al(1)} = X_{k95} \cdot l_{EF} = 0,0817 \cdot 0,110 = 8,99 \text{ m}\Omega$
Vedení 1G	$R_{1G_Al(1)} = R_{k95} \cdot l_{1G} = 0,383 \cdot 0,775 = 296,65 \text{ m}\Omega$
	$X_{1G_Al(1)} = X_{k95} \cdot l_{1G} = 0,0817 \cdot 0,775 = 63,30 \text{ m}\Omega$
Vedení 1G-K	$R_{1G-K_Al(1)} = R_{k204} \cdot l_{1G} = 0,152 \cdot 0,775 = 117,42 \text{ m}\Omega$
	$X_{1G-K_Al(1)} = X_{k240} \cdot l_{1G} = 0,0785 \cdot 0,775 = 60,87 \text{ m}\Omega$
Vedení GH	$R_{GH_Al(1)} = R_{k150} \cdot l_{GH} = 0,242 \cdot 0,488 = 118,30 \text{ m}\Omega$
	$X_{GH_Al(1)} = X_{k150} \cdot l_{GH} = 0,0785 \cdot 0,488 = 38,33 \text{ m}\Omega$
Vedení GI	$R_{GI_Al(1)} = R_{k95} \cdot l_{GI} = 0,383 \cdot 0,443 = 169,57 \text{ m}\Omega$

$$X_{GI_AI(1)} = X_{k95} \cdot l_{GI} = 0,0817 \cdot 0,443 = 36,19 \text{ m}\Omega$$

Vedení GK $R_{GK_AI(1)} = R_{k240} \cdot l_{GK} = 0,152 \cdot 0,681 = 103,18 \text{ m}\Omega$

$$X_{GK_AI(1)} = X_{k240} \cdot l_{GK} = 0,0785 \cdot 0,681 = 53,49 \text{ m}\Omega$$

Vedení KL $R_{KL_AI(1)} = R_{k150} \cdot l_{KL} = 0,242 \cdot 0,277 = 67,15 \text{ m}\Omega$

$$X_{KL_AI(1)} = X_{k150} \cdot l_{KL} = 0,0785 \cdot 0,277 = 21,76 \text{ m}\Omega$$

Vedení KM $R_{KM_AI(1)} = R_{k185} \cdot l_{KM} = 0,197 \cdot 0,205 = 40,30 \text{ m}\Omega$

$$X_{KM_AI(1)} = X_{k185} \cdot l_{KM} = 0,0785 \cdot 0,205 = 16,10 \text{ m}\Omega$$

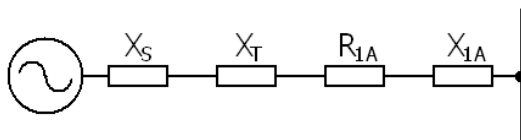
9.3.6. Shrnutí

	Varianta 1		Varianta 2 a 3		Varianta 4, 5 a 6	
	R (mΩ)	X (mΩ)	R (mΩ)	X (mΩ)	R (mΩ)	X (mΩ)
1A	193,68	39,02	193,68	39,02	238,96	37,57
1B	55	49,24	55	49,24	123,24	49,24
BC	76,01	28,02	76,01	28,02	83,15	26,94
BD	53,86	24,11	53,86	24,11	60,34	24,11
1E	166,84	74,69	166,84	74,69	144,09	74,69
EF	19,30	8,64	19,30	8,64	42,11	8,99
1G			326,32	65,74	296,65	63,30
1G-K			67,98	60,87	117,42	60,87
1G+K	67,98	60,87				
GH	108,14	39,86	10,81	39,86	118,30	38,33
GI	133,23	36,19	186,53	37,58	169,57	36,19
GK	77,50	53,49	77,50	53,49	103,18	53,47
KL	38,88	21,76	61,39	22,63	67,15	21,76
KM	23,33	16,10	23,33	16,10	40,30	16,10

Tab. 9: Parametry vedení pro výpočet minimálních zkratových proudů

9.4. Výpočet minimálních zkratových proudů

9.4.1. Varianta 1



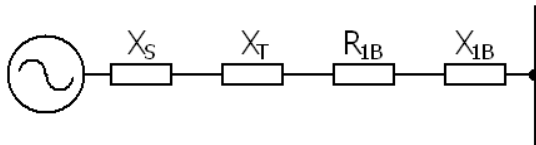
$$Z_{1A(1)} = \sqrt{R_{1A}^2 + (X_{1A} + X_{S(1)} + X_{T(1)})^2} = \sqrt{193,7^2 + (39,02 + 0,608 + 4,8)^2} = 198,71 m\Omega$$

$$Z_{1A(0)} = \sqrt{(3 \cdot R_{1A})^2 + (3 \cdot X_{1A} + 0,85 \cdot X_{T(1)})^2} = \sqrt{(3 \cdot 193,7)^2 + (3 \cdot 39,02 + 0,85 \cdot 4,8)^2} = 593,55 m\Omega$$

$$I''_{k3} = \frac{c_{max} \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot Z_{A1(1)}} = \frac{0,95 \cdot 0,4}{\sqrt{3} \cdot 198,71 \cdot 10^{-3}} = 1,10 kA$$

$$I''_{k2} = \frac{c_{max} \cdot U_n}{(Z_{1A(1)} + Z_{1A(2)})} = \frac{c_{max} \cdot U_n}{2 \cdot Z_{1A(1)}} = \frac{1,1 \cdot 0,4}{2 \cdot 198,71 \cdot 10^{-3}} = 0,96 kA$$

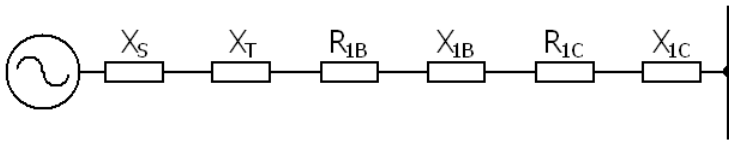
$$I''_{k1} = \frac{c_{max} \cdot \sqrt{3} \cdot U_n}{(Z_{1A(1)} + Z_{1A(2)} + Z_{1A(0)})} = \frac{c_{max} \cdot \sqrt{3} \cdot U_n}{2 \cdot Z_{1A(1)} + Z_{A1(0)}} = \frac{1,1 \cdot \sqrt{3} \cdot 0,4}{(2 \cdot 198,7 + 593,6) \cdot 10^{-3}} = 0,38 kA$$



$$Z_{1B(1)} = 77,54 m\Omega$$

$$Z_{1B(0)} = 224,22 m\Omega$$

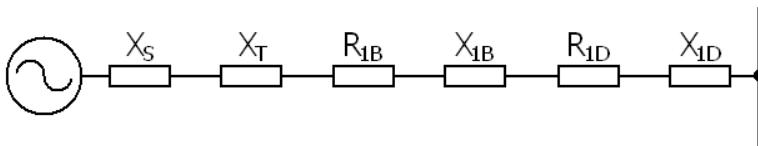
$$I''_{k1} = 1,00 kA$$



$$Z_{1C(1)} = 154,91 m\Omega$$

$$Z_{1C(0)} = 458,37 m\Omega$$

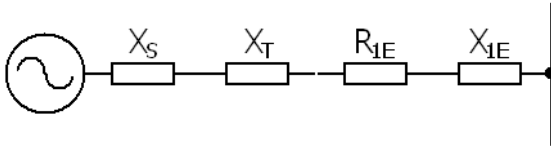
$$I''_{k1} = 0,49 kA$$



$$Z_{1D(1)} = 134,37 m\Omega$$

$$Z_{1D(0)} = 396,10 m\Omega$$

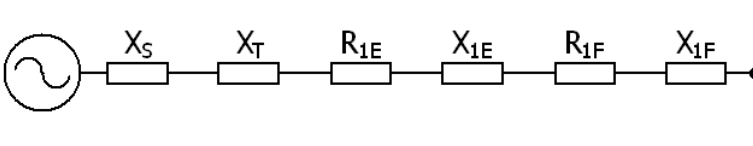
$$I''_{k1} = 0,57 kA$$



$$Z_{1E(1)} = 185,07 m\Omega$$

$$Z_{1E(0)} = 550,07 m\Omega$$

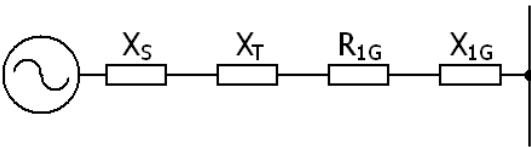
$$I''_{k1} = 0,41 kA$$



$$Z_{1F(1)} = 206,21 m\Omega$$

$$Z_{1F(0)} = 613,50 m\Omega$$

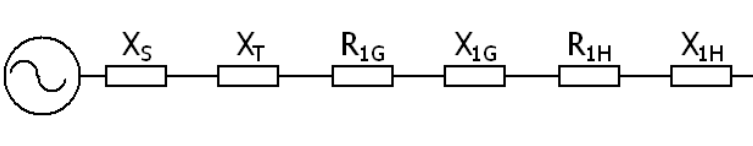
$$I''_{k1} = 0,37 kA$$



$$Z_{1G+K(1)} = 94,9 m\Omega$$

$$Z_{1G+K(0)} = 27,65 m\Omega$$

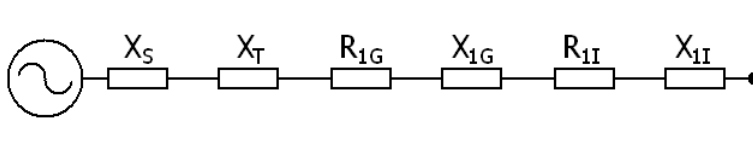
$$I''_{k1} = 0,81 kA$$



$$Z_{1H(1)} = 205,64 m\Omega$$

$$Z_{1H(0)} = 610,72 m\Omega$$

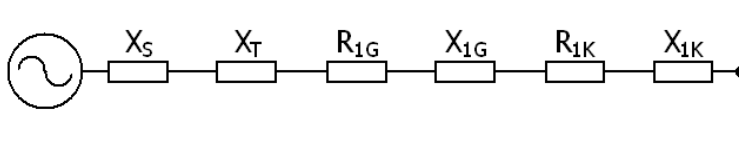
$$I''_{k1} = 0,37 kA$$



$$Z_{1I(1)} = 225,80 m\Omega$$

$$Z_{1I(0)} = 671,98 \text{ m}\Omega$$

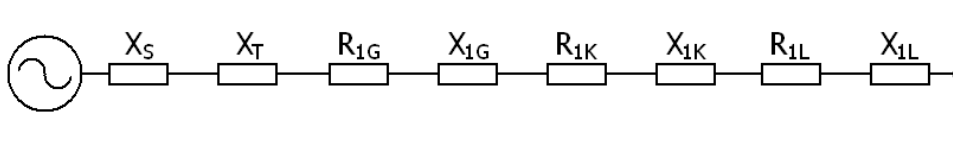
$$I''_{k1} = 0,34 \text{ kA}$$



$$Z_{1K(1)} = 188,43 \text{ m}\Omega$$

$$Z_{1K(0)} = 557,66 \text{ m}\Omega$$

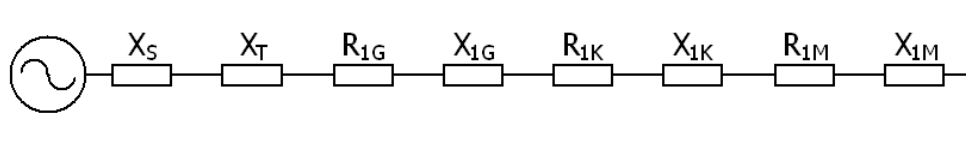
$$I''_{k1} = 0,41 \text{ kA}$$



$$Z_{1L(1)} = 232,41 \text{ m}\Omega$$

$$Z_{1L(0)} = 689,90 \text{ m}\Omega$$

$$I''_{k1} = 0,33 \text{ kA}$$

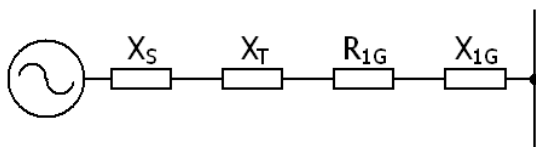


$$Z_{1M(1)} = 216,69 \text{ m}\Omega$$

$$Z_{1M(0)} = 642,53 \text{ m}\Omega$$

$$I''_{k1} = 0,35 \text{ kA}$$

9.4.2. Varianta 2

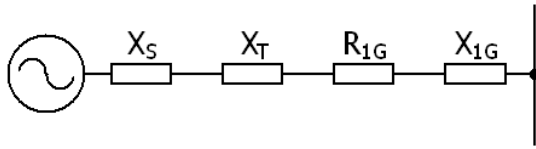


$$Z_{1G(1)} = 333,98 \text{ m}\Omega$$

$$Z_{1G(0)} = 999,43 \text{ m}\Omega$$

$$I''_{k1} = 0,23 \text{ kA}$$

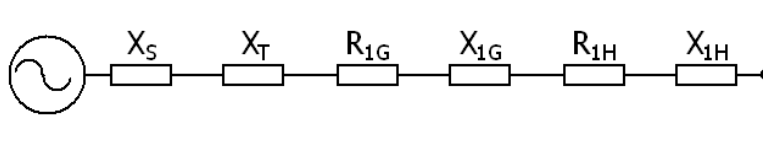
9.4.3. Varianta 3



$$Z_{1G-K(1)} = 94,9 m\Omega$$

$$Z_{1G-K(0)} = 27,65 m\Omega$$

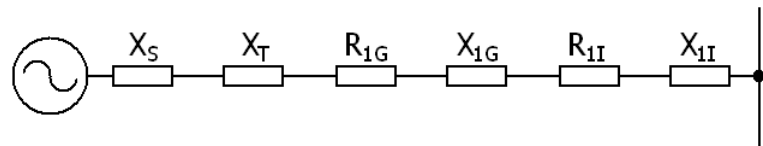
$$I''_{k1} = 0,81 kA$$



$$Z_{1H(1)} = 205,64 m\Omega$$

$$Z_{1H(0)} = 610,72 m\Omega$$

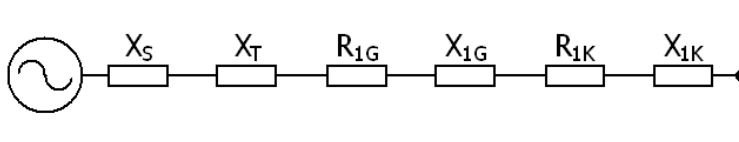
$$I''_{k1} = 0,37 kA$$



$$Z_{1I(1)} = 274,88 m\Omega$$

$$Z_{1I(0)} = 820,14 m\Omega$$

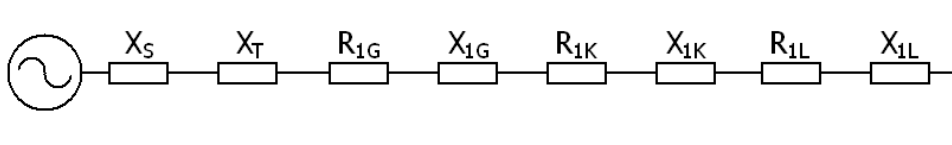
$$I''_{k1} = 0,28 kA$$



$$Z_{1K(1)} = 188,43 m\Omega$$

$$Z_{1K(0)} = 557,66 m\Omega$$

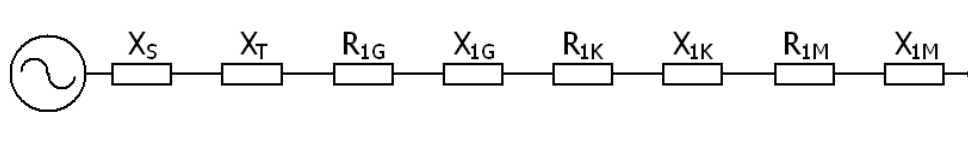
$$I''_{k1} = 0,41 kA$$



$$Z_{1L(1)} = 250,11 \text{ m}\Omega$$

$$Z_{1L(0)} = 746,58 \text{ m}\Omega$$

$$I''_{k1} = 0,30 \text{ kA}$$

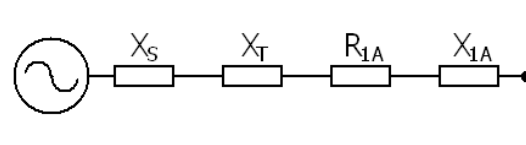


$$Z_{1M(1)} = 216,69 \text{ m}\Omega$$

$$Z_{1M(0)} = 642,53 \text{ m}\Omega$$

$$I''_{k1} = 0,35 \text{ kA}$$

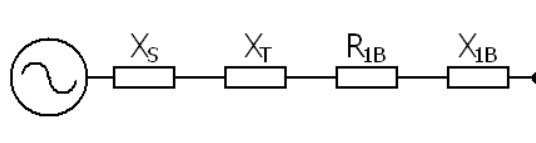
9.4.4. Varianta 4, 5 a 6



$$Z_{1A(1)} = 242,80 \text{ m}\Omega$$

$$Z_{1A(0)} = 720,63 \text{ m}\Omega$$

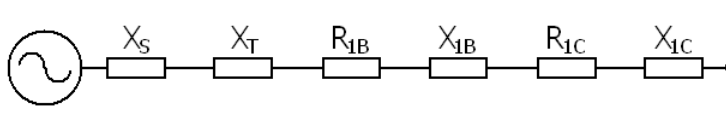
$$I''_{k1} = 0,31 \text{ kA}$$



$$Z_{1B(1)} = 134,82 \text{ m}\Omega$$

$$Z_{1B(0)} = 399,7 \text{ m}\Omega$$

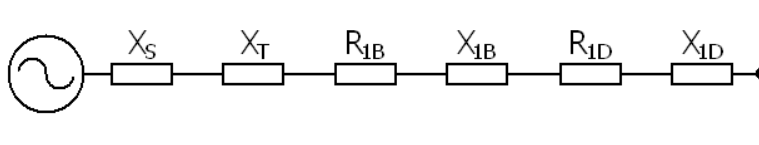
$$I''_{k1} = 0,57 \text{ kA}$$



$$Z_{1C(1)} = 221,94 \text{ m}\Omega$$

$$Z_{1C(0)} = 661,44 \text{ m}\Omega$$

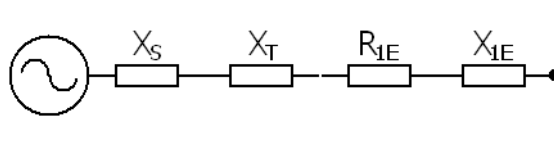
$$I''_{k1} = 0,34 \text{ kA}$$



$$Z_{1D(1)} = 199,77 \text{ m}\Omega$$

$$Z_{1D(0)} = 594,63 \text{ m}\Omega$$

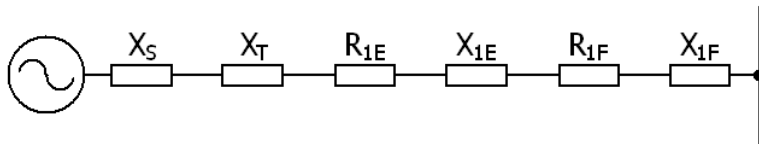
$$I''_{k1} = 0,38 \text{ kA}$$



$$Z_{1E(1)} = 164,86 \text{ m}\Omega$$

$$Z_{1E(0)} = 488,79 \text{ m}\Omega$$

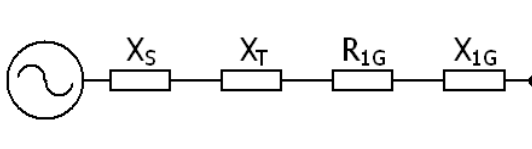
$$I''_{k1} = 0,46 \text{ kA}$$



$$Z_{1F(1)} = 206,41 \text{ m}\Omega$$

$$Z_{1F(0)} = 614,09 \text{ m}\Omega$$

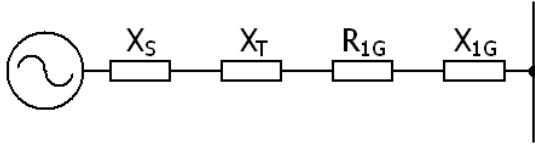
$$I''_{k1} = 0,37 \text{ kA}$$



$$Z_{1G(1)} = 304,50 m\Omega$$

$$Z_{1G(0)} = 910,85 m\Omega$$

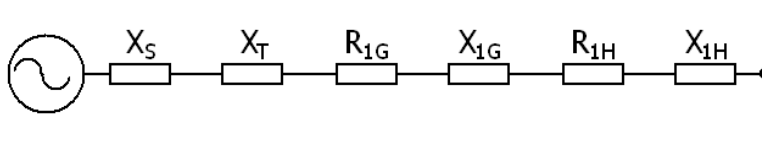
$$I''_{k1} = 0,25 kA$$



$$Z_{1G-K(1)} = 134,84 m\Omega$$

$$Z_{1G-K(0)} = 398,68 m\Omega$$

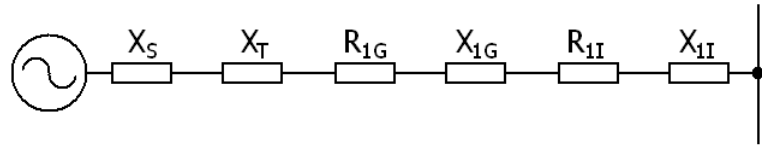
$$I''_{k1} = 0,57 kA$$



$$Z_{1H(1)} = 257,89 m\Omega$$

$$Z_{1H(0)} = 768,84 m\Omega$$

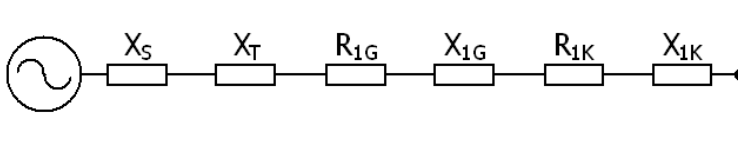
$$I''_{k1} = 0,30 kA$$



$$Z_{1I(1)} = 304,74 m\Omega$$

$$Z_{1I(0)} = 910,20 m\Omega$$

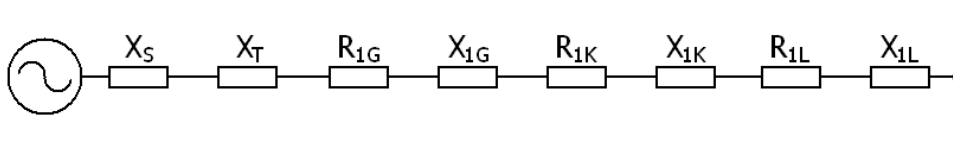
$$I''_{k1} = 0,25 kA$$



$$Z_{1K(1)} = 251,02 m\Omega$$

$$Z_{1K(0)} = 747,34 m\Omega$$

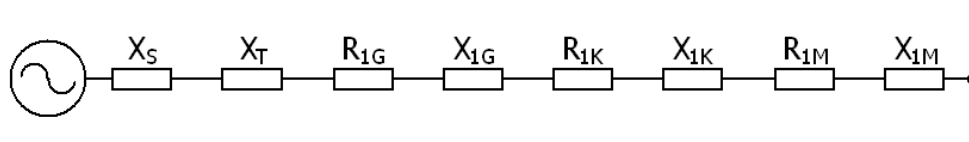
$$I''_{k1} = 0,30 kA$$



$$Z_{1L(1)} = 320,67 \text{ m}\Omega$$

$$Z_{1L(0)} = 956,72 \text{ m}\Omega$$

$$I''_{k1} = 0,24 \text{ kA}$$



$$Z_{1M(1)} = 294,16 \text{ m}\Omega$$

$$Z_{1M(0)} = 876,93 \text{ m}\Omega$$

$$I''_{k1} = 0,26 \text{ kA}$$

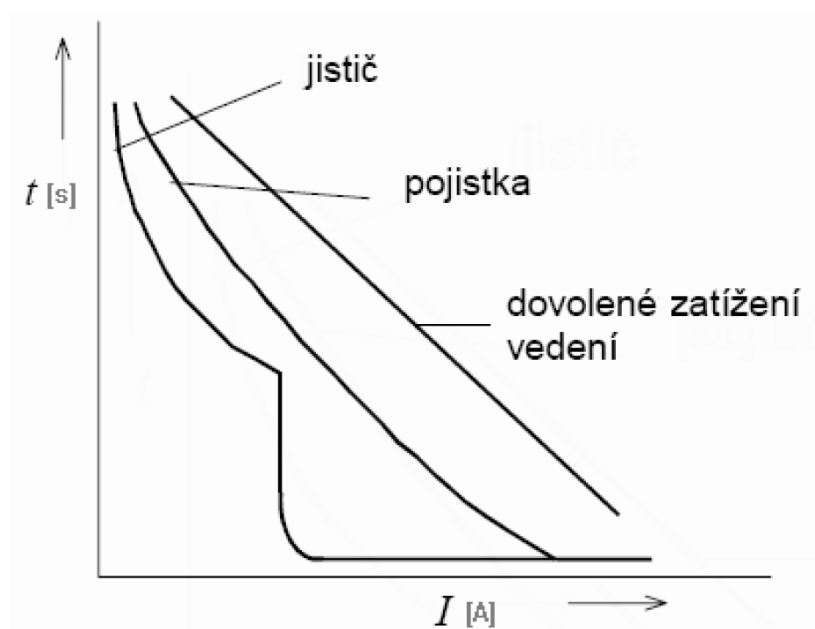
9.4.5. Shrnutí

Místo	$I''_{k1} \text{ (kA)}$		
	Varianta 1 a 2	Varianta 3	Varianta 4, 5 a 6
A	0,38	0,38	0,31
B	1,00	1,00	0,57
C	0,49	0,49	0,34
D	0,57	0,57	0,38
E	0,41	0,41	0,46
F	0,37	0,37	0,37
G		0,23	0,25
G-K	0,81	0,81	0,57
H	0,37	0,37	0,30
I	0,34	0,28	0,25
K	0,41	0,41	0,30
L	0,33	0,30	0,24
M	0,35	0,35	0,26

Tab. 10: Jednofázový počáteční zkratový proud (minimální)

9.5. Výběr ochran

Podle ČSN 33 2000-3 čl. 314 musí mít každé zařízení obvody rozděleny na více částí, kde každá část má vlastní jištění. Je to z důvodů snadnější manipulace a údržby. V podstatě jde o to, aby při nadproudu vypnul v co nejkratším čase pouze ochranný prvek v dané části, takže nedochází k nežádoucímu vypnutí ostatních částí. Reaguje tedy pouze nejbližší nadřazený jističí prvek. Při poruše pouze v jednom podružném obvodu se tedy nepřerušuje dodávka elektrické energie do hlavního a ostatních podružných obvodů. V případech kdy dojde ke zkratu a vypínají jističe podružných i hlavních obvodů, je selektivity dosaženo použitím úmyslného zpoždění vybavení zkratové spouště.



Obr. 24: Ampérsekundová charakteristika jističe, pojistky a dovoleného zatížení vedení

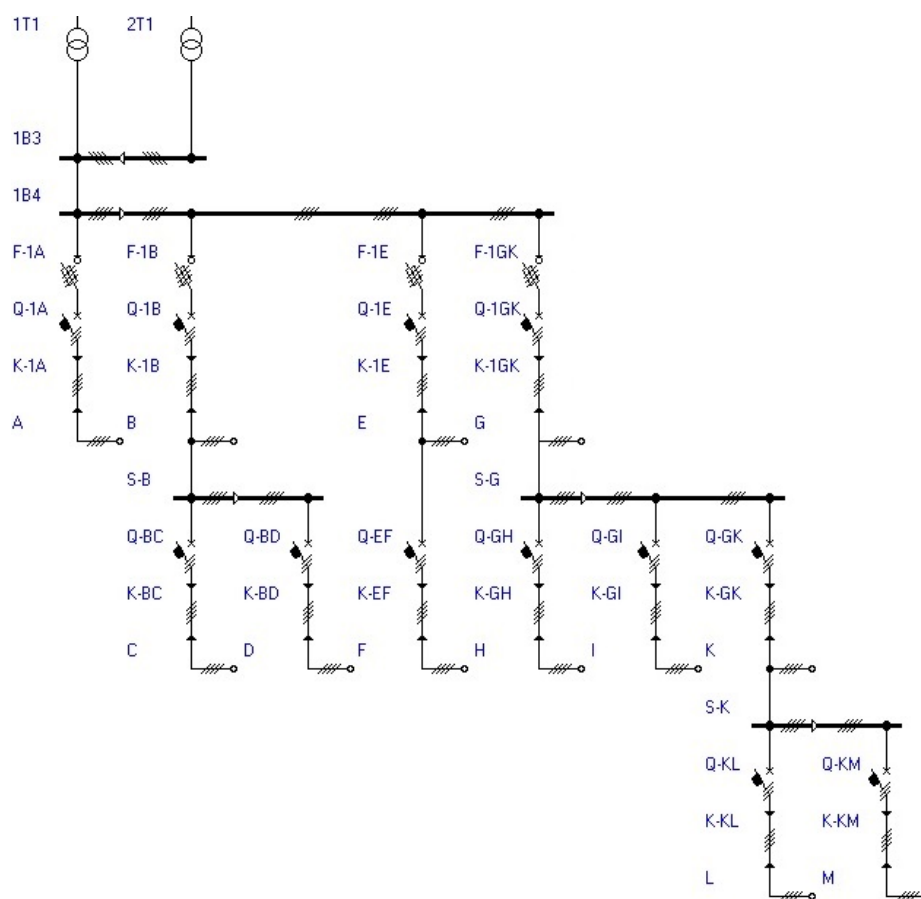
V této práci budou použity tyto přístroje od výrobce OEZ s.r.o.:

- Kompaktní jističe Modeion (řady BC160 a BD250)
- Pojistkové systémy Varius (pojistkové vložky PNAX a řadové pojistkové odpínače FHx)

Každý kabel je jištěn vlastním jističem. Paprsky A, B, E a G (G-K) jsou navíc jištěny pojistkami pro jejich schopnost omezit maximální zkratové proudy.

V následujících kapitolách jsou uvedeny zvolené ochrany. V příloze je potom k dispozici přehled zvolených nastavení nadproudových spouští jističů řady BD250.

9.5.1. Varianta 1

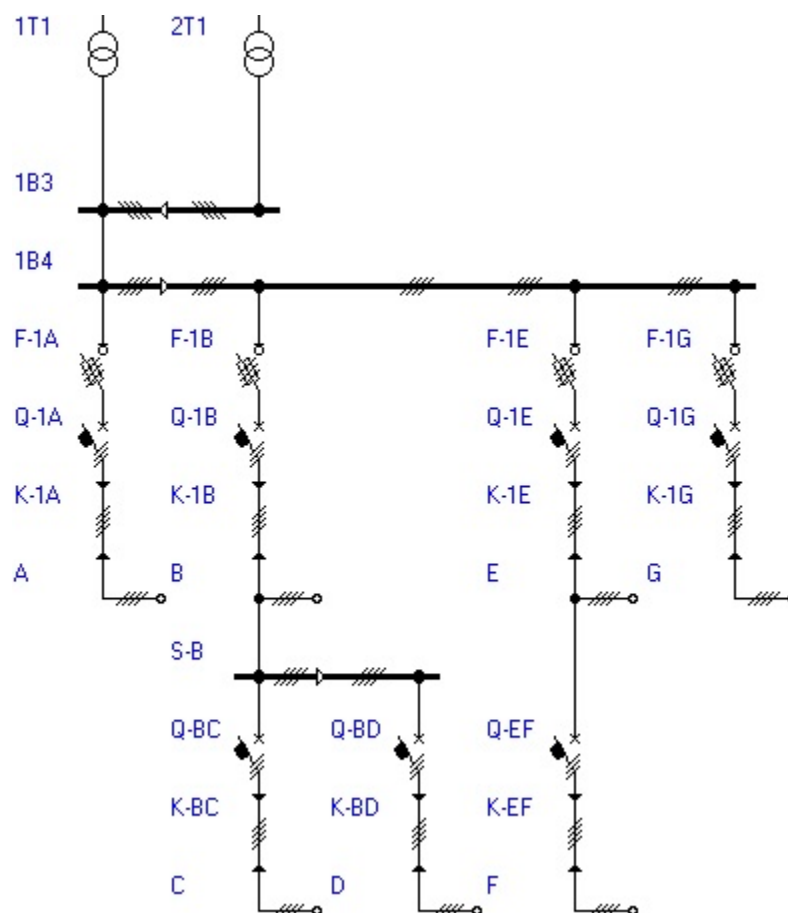


Obr. 25: Schéma sítě pro variantu 1

Papřsek	Navrhnutá ochrana			
	Označení	Jistič	Označení	Pojistka
1A	Q-A	BC160NT 305-80-D	F-A	PNA1 160A gG
1B	Q-B	BD250NE305 + SE-BD-0250-DTV3	F-B	PNA2 250A gG
BC	Q-C	BC160NT 305-63-D		
BD	Q-D	BC160NT 305-100-D		
1E	Q-E	2x BC160NT 305-100-D	F-E	PHNA2 315A gG
EF	Q-F	BC160NT 305-100-D		
1GK	Q-GK	4x BD250NE305 + SE-BD-0160-DTV3	F-GK	PNA3 630A gG
GH	Q-H	BC160NT 305-100-D		
GI	Q-I	BC160NT 305-63-D		
GK	Q-K	3x BD250NE305 + SE-BD-0160-DTV3		
KL	Q-L	BD250NE305 + SE-BD-0100-DTV3		
KM	Q-M	BD250NE305 + SE-BD-0100-DTV3		

Tab. 11: Přehled ochran navržených pro variantu 1

9.5.2. Varianta 2

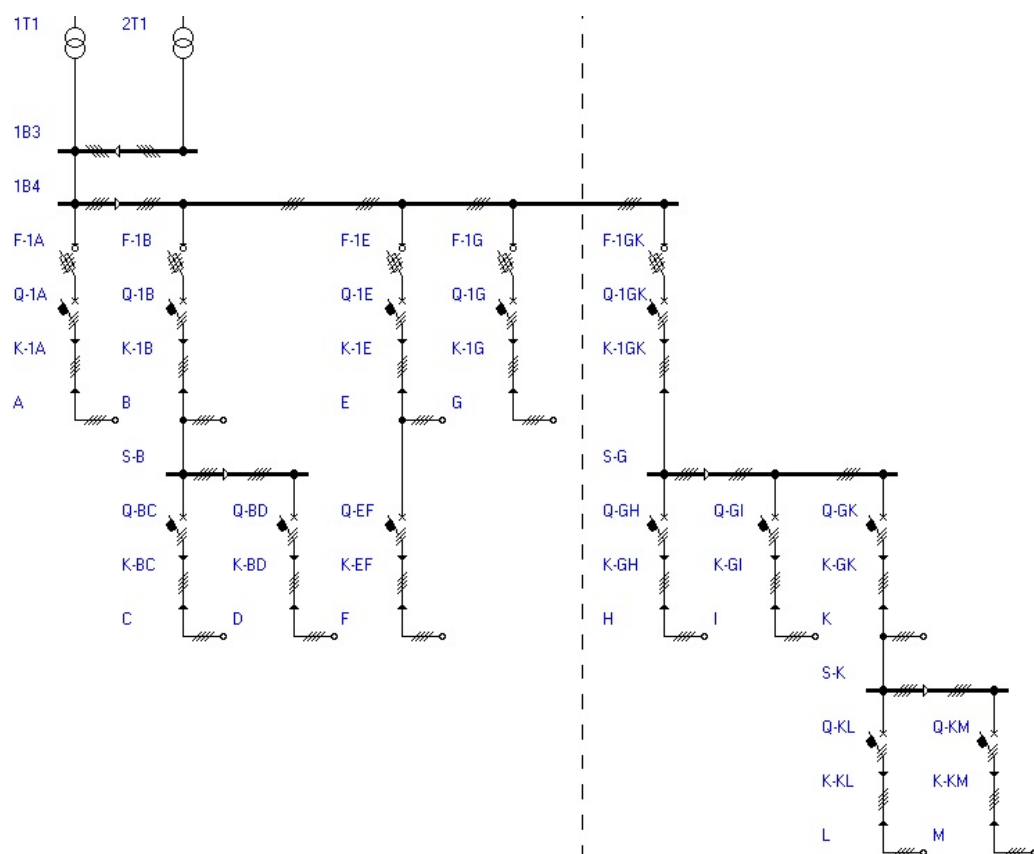


Obr. 26: Schéma sítě pro variantu 2

Paprasek	Navrhnutá ochrana			
	Označení	Jistič	Označení	Pojistka
1A	Q-A	BC160NT 305-80-D	F-A	PNA1 160A gG
1B	Q-B	BD250NE305 + SE-BD-0250-DTV3	F-B	PNA2 250A gG
BC	Q-C	BC160NT 305-63-D		
BD	Q-D	BC160NT 305-100-D		
1E	Q-E	2x BC160NT 305-100-D	F-E	PHNA2 315A gG
EF	Q-F	BC160NT 305-100-D		
1G	Q-G	BC160NT 305-63-D	F-G	PNA1 125A gG

Tab. 12: Přehled ochran navrhnutých pro variantu 2

9.5.3. Varianta 3

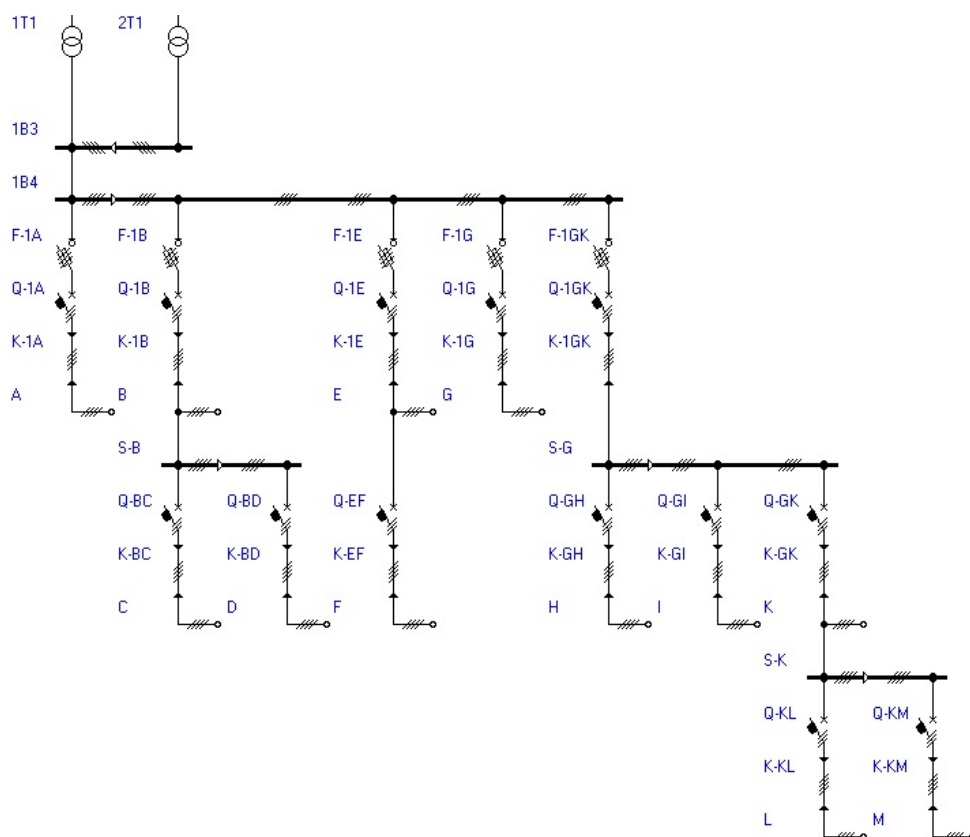


Obr. 27: Schéma sítě pro variantu 3

Papřsek	Navrhnutá ochrana			
	Označení	Jistič	Označení	Pojistka
1A	Q-A	BC160NT 305-80-D	F-A	PNA1 160A gG
1B	Q-B	BD250NE305 + SE-BD-0250-DTV3	F-B	PNA2 250A gG
BC	Q-C	BC160NT 305-63-D		
BD	Q-D	BC160NT 305-100-D		
1E	Q-E	2x BC160NT 305-100-D	F-E	PHNA2 315A gG
EF	Q-F	BC160NT 305-100-D		
1G	Q-G	BC160NT 305-63-D	F-G	PNA1 125A gG
1GK	Q-GK	4x BD250NE305 + SE-BD-0160-DTV3	F-GK	PNA3 630A gG
GH	Q-H	BC160NT 305-100-D		
GI	Q-I	BC160NT 305-63-D		
GK	Q-K	3x BD250NE305 + SE-BD-0160-DTV3		
KL	Q-L	BD250NE305 + SE-BD-0100-DTV3		
KM	Q-M	BD250NE305 + SE-BD-0100-DTV3		

Tab. 13: Přehled ochrany navržených pro variantu 3

9.5.4. Varianta 4

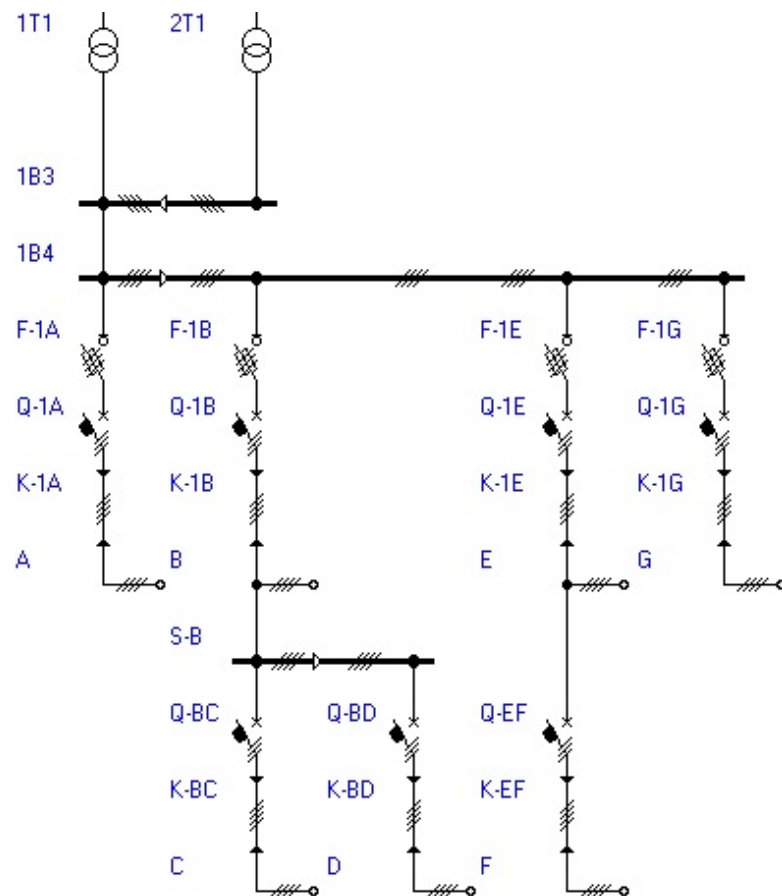


Obr. 28: Schéma sítě pro variantu 4

Papřsek	Navrhnutá ochrana			
	Označení	Jistič	Označení	Pojistka
1A	Q-A	BC160NT 305-80-D	F-A	PNA1 160A gG
1B	Q-B	2x BD250NE305 + SE-BD-0160-DTV3	F-B	PNA2 315A gG
BC	Q-C	BD250NE305 + SE-BD-0100-DTV3		
BD	Q-D	BD250NE305 + SE-BD-0100-DTV3		
1E	Q-E	2x BD250NE305 + SE-BD-0160-DTV3	F-E	PHNA2 315A gG
EF	Q-F	BC160NT 305-100-D		
1G	Q-G	BC160NT 305-63-D	F-G	PNA1 125A gG
1GK	Q-GK	6x BD250NE305 + SE-BD-0100-DTV3	F-GK	PNA3 630A gG
GH	Q-H	BD250NE305 + SE-BD-0100-DTV3		
GI	Q-I	BC160NT 305-63-D		
GK	Q-K	4x BD250NE305 + SE-BD-0100-DTV3		
KL	Q-L	BD250NE305 + SE-BD-0100-DTV3		
KM	Q-M	BD250NE305 + SE-BD-0100-DTV3		

Tab. 14: Přehled ochran navržených pro variantu 4

9.5.5. Varianta 5



Obr. 29: Schéma sítě variantu 5

Papřsek	Navrhnutá ochrana			
	Označení	Jistič	Označení	Pojistka
1A	Q-A	BC160NT 305-80-D	F-A	PNA1 160A gG
1B	Q-B	2x BD250NE305 + SE-BD-0160-DTV3	F-B	PNA2 315A gG
BC	Q-C	BD250NE305 + SE-BD-0100-DTV3		
BD	Q-D	BD250NE305 + SE-BD-0100-DTV3		
1E	Q-E	2x BD250NE305 + SE-BD-0160-DTV3	F-E	PHNA2 315A gG
EF	Q-F	BC160NT 305-100-D		
1G	Q-G	BC160NT 305-63-D	F-G	PNA1 125A gG

Tab. 15: Přehled ochran navržených pro variantu 5

9.5.6. Varianta 6

Návrh pro variantu 6 je shodný s variantou 4.

9.6. Tepelné účinky zkratových proudů

Při průchodu zkratového proudu vodičem se silně zahřívá jeho jádro a izolace. Při překročení určité teploty může dojít k roztavení jádra, nebo k poškození izolace. Proto je třeba při návrhu průřezu vodiče počítat i s tepelnými účinky zkratového proudu.

Pokud průřez vodiče vyjde větší, než jsme určili na základě výpočtu dovoleného proudového zatížení, je třeba respektovat tepelné účinky zkratového proudu a vybrat nejbližší vyšší průřez, než nám vyšel při tomto výpočtu. Pokud úbytek napětí na vedení při menším průřezu vedení byl splněn, lze předpokládat, že je splněn i při vyšším průřezu vodičů.

Ekvivalentní oteplovací proud I_{th} lze stanovit použitím součinitele k_e :

$$I_{th} = I_k'' \cdot k_e$$

kde: k_e je součinitel pro orientační stanovení ekvivalentního oteplovacího proudu.

$$k_e = \sqrt{1 + \frac{T_{str}}{t_k}}$$

$$T_{str} = T_a = \frac{X}{314 \cdot R}$$

Pro přesnější určení ekvivalentního oteplovacího proudu použijeme vztah:

$$I_{th} = I_k'' \cdot \sqrt{m + n}$$

kde: m součinitel pro tepelné účinky stejnosměrné složky zkratového proudu;

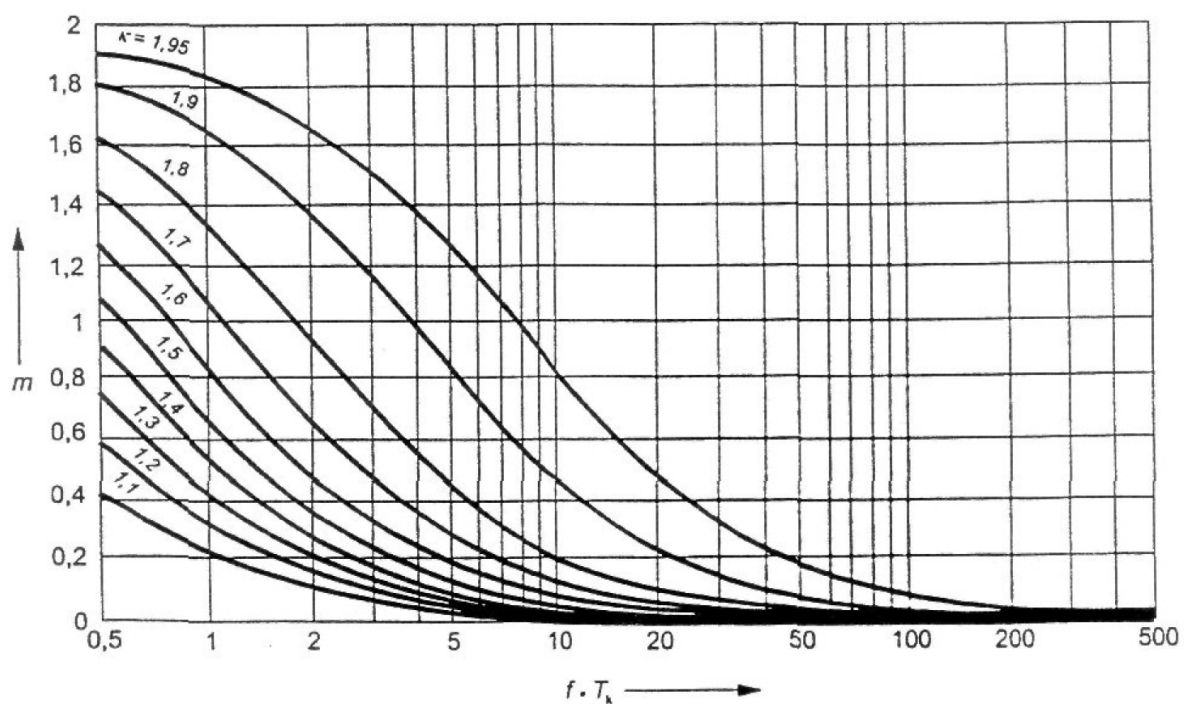
n součinitel pro tepelné účinky střídavé složky zkratového proudu;

t_k doba trvání zkratu

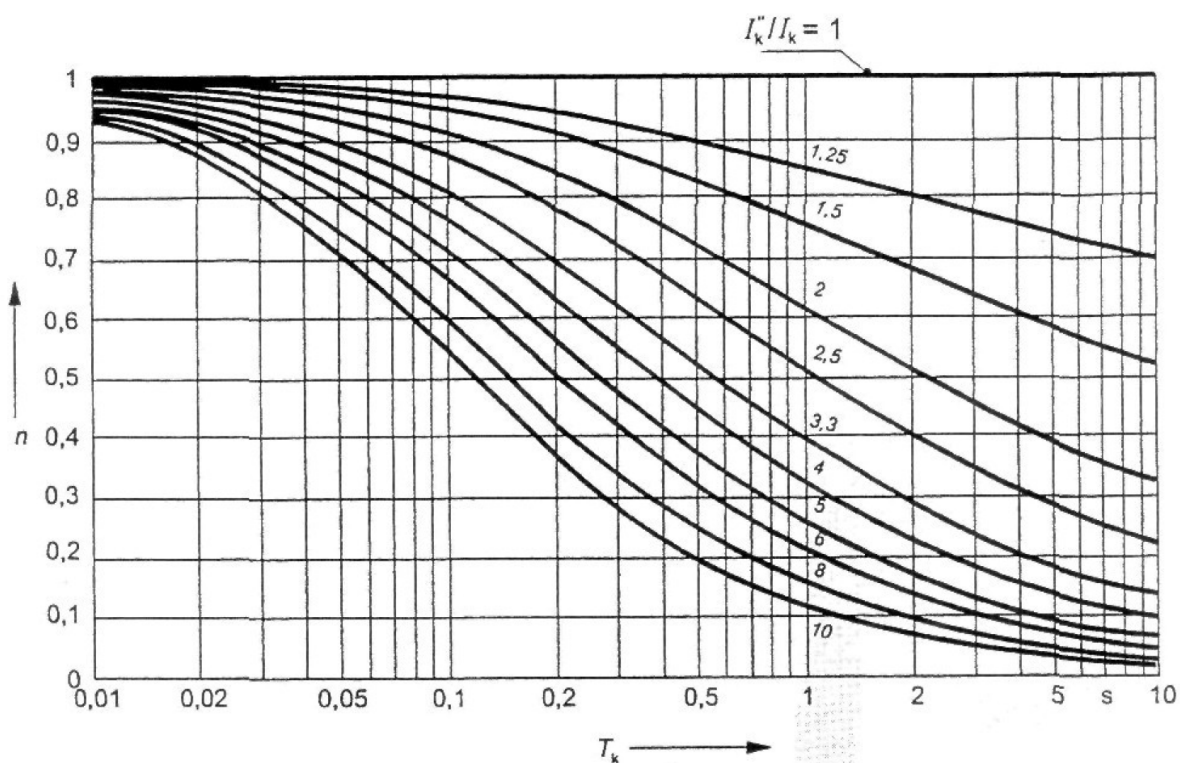
Hodnoty součinitelů m a n odečtu z následujících grafů.

Vypínací čas vysokých hodnot zkratových proudů u zvolených ochran je $T_k = 10ms = 0,01s$.

Nejvyšší hodnota koeficientu κ je u větve 1-GK v 1. variantě ($\kappa = 1,146$)



Obr. 30: Součinitel m pro tepelný účinek stejnosměrné složky zkratového proudu [6]



Obr. 31: Součinitel n pro tepelný účinek střídavé složky zkratového proudu [6]

Z grafů jsem odečetl následující hodnoty součinitelů m a n

m 0,5

n 1

Se znalostí těchto hodnot můžu určit ekvivalentní oteplovací proudy

Pro kabely za přípojnicí 1

$$I_{th} = I_k'' \cdot \sqrt{m+n} = 46,15 \cdot \sqrt{0,5+1} = 56,52 \text{ kA}$$

Podle vzorce $S_{min} \geq \frac{I_{ke} \cdot \sqrt{t_k}}{K}$ můžu určit minimální průřez vodiče

Koeficient K pro dimenzování vedení podle tepelných účinků zkratového proudu				
Součinitel K	materiál jádra vodiče			
	Cu		Al	
	materiál izolace vodiče			
	PVC	Pryž	PVC	Pryž
	115	135	74	87

Tab. 16: Koeficient K pro dimenzování vedení podle tepelných účinků zkratového proudu [3]

Pro kabely 1-CYKY

$$S_{min} \geq \frac{I_{ke} \cdot \sqrt{t_k}}{K} = \frac{56,52 \cdot \sqrt{0,01}}{115} = 49,15 \text{ mm}^2$$

Nejmenší průřez kabelů u variant 1, 2 a 3 je 50mm². Všechny kabely v navrhnuté v těchto variantách jsou dostatečné s ohledem na tepelné účinky zkratových proudů.

Pro kabely 1-AYKY

$$S_{min} \geq \frac{I_{ke} \cdot \sqrt{t_k}}{K} = \frac{56,52 \cdot \sqrt{0,01}}{74} = 76,38 \text{ mm}^2$$

Pro varianty 4, 5 a 6 vyšel minimální průřez 76,38 mm², což je víc než navrhnutý průřez kabelu u větve 1A. Z toho důvodu je třeba zvýšit průřez kabelu u této větve. Konečný průřez kabelu bude 95 mm². Všechny ostatní kabely jsou s ohledem na tepelné účinky zkratových proudů dostatečné.

Nový minimální zkratový proud pro větev 1A bude:

$$Z_{1A(1)} = 181,25 \text{ m}\Omega$$

$$Z_{1A(0)} = 540,99 \text{ m}\Omega$$

$$I_{k1}'' = 0,42 \text{ kA}$$

10. Technickoekonomické zhodnocení

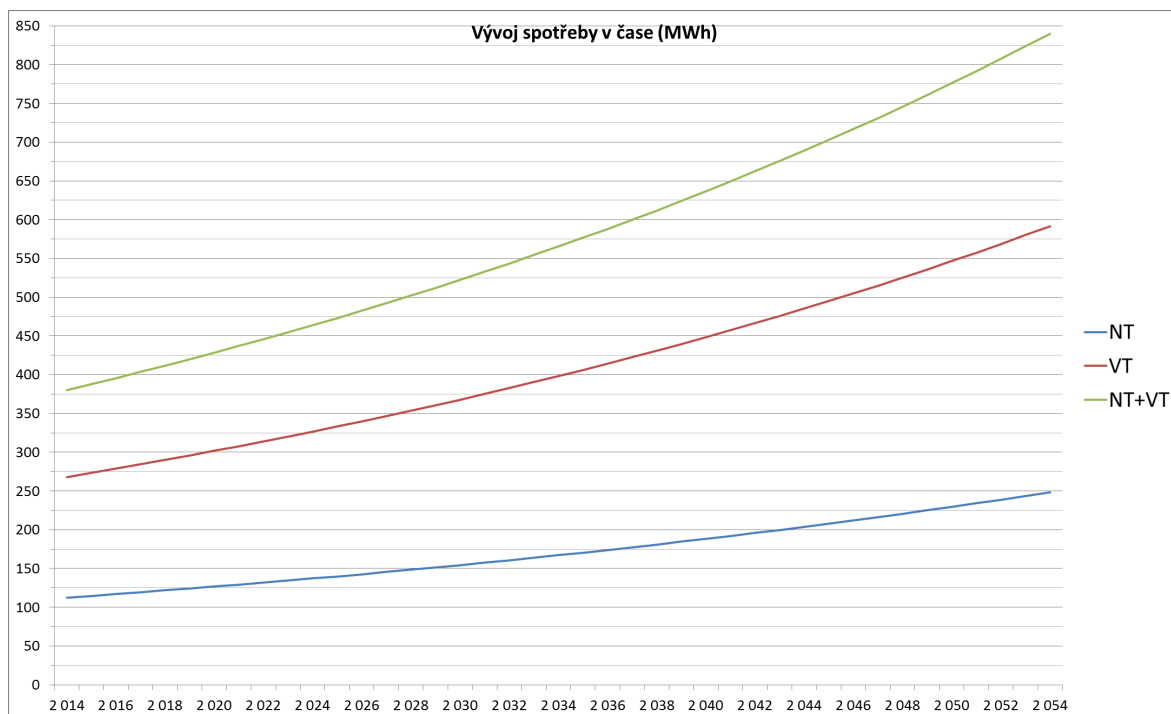
Z důvodu nemožnosti přímého porovnávání kritérií u jednotlivých variant jsem kritéria zredukoval na jedno čistě ekonomické – čistou současnou hodnotu (NPV).

10.1. Vývoj spotřeby a ceny elektrické energie

V této práci budu předpokládat meziroční nárůst spotřeby elektrické energie na úrovni 2%. Cenu budu uvažovat konstantní po celou dobu životnosti.

Rok	Spotřebovaná energie za rok			Rok	Spotřebovaná energie za rok		
	kWh NT	kWh VT	kWh NT+VT		kWh NT	kWh VT	kWh NT+VT
2 010	100 824	240 620	341 444	2 033	163 871	390 322	554 193
2 011	111 172	264 331	375 503	2 034	167 148	398 128	565 277
2 012	108 118	257 525	365 643	2 035	170 491	406 091	576 582
2 013	110 280	262 676	372 956	2 036	173 901	414 213	588 114
2 014	112 486	267 929	380 415	2 037	177 379	422 497	599 876
2 015	114 736	273 288	388 023	2 038	180 927	430 947	611 874
2 016	117 030	278 753	395 784	2 039	184 545	439 566	624 111
2 017	119 371	284 328	403 699	2 040	188 236	448 357	636 593
2 018	121 758	290 015	411 773	2 041	192 001	457 324	649 325
2 019	124 194	295 815	420 009	2 042	195 841	466 471	662 312
2 020	126 677	301 732	428 409	2 043	199 758	475 800	675 558
2 021	129 211	307 766	436 977	2 044	203 753	485 316	689 069
2 022	131 795	313 922	445 717	2 045	207 828	495 023	702 850
2 023	134 431	320 200	454 631	2 046	211 984	504 923	716 907
2 024	137 120	326 604	463 724	2 047	216 224	515 022	731 246
2 025	139 862	333 136	472 998	2 048	220 548	525 322	745 870
2 026	142 659	339 799	482 458	2 049	224 959	535 828	760 788
2 027	145 513	346 595	492 107	2 050	229 459	546 545	776 004
2 028	148 423	353 527	501 949	2 051	234 048	557 476	791 524
2 029	151 391	360 597	511 988	2 052	238 729	568 625	807 354
2 030	154 419	367 809	522 228	2 053	243 503	579 998	823 501
2 031	157 507	375 165	532 673	2 054	248 373	591 598	839 971
2 032	160 658	382 669	543 326				

Tab. 17: Předpokládaný vývoj spotřeby elektrické energie



Obr. 32: Předpokládaný vývoj spotřeby elektrické energie

10.2. Náklady

10.2.1. NPV

Čistá současná hodnota (ang. Net Present Value, známá také pod zkratkou NPV) patří k nejdéle používaným metodám analýzy investic, na které lze dobře popsat základní principy hodnocení efektivnosti investic, případně způsoby srovnávání jednotlivých investičních příležitostí mezi sebou. Je jedním z nejvhodnějších a nejpoužívanějších finančních kritérií. Je v ní zahrnuta celá doba životnosti projektu, i možnost investování do jiného stejně rizikového projektu. Bere v úvahu časovou hodnotu peněz, závisí pouze na předvídaných hotovostních tocích a alternativních nákladech kapitálu.

Čistá současná hodnota se vypočte jako součet současných (diskontovaných) hodnot všech peněžních toků investice. To znamená, že je nutno nejdříve stanovit hodnotu každého dílčího peněžního toku investice a tyto hodnoty přepočíst (diskontovat) na základě přijaté diskontní sazby pro hodnocenou investici. Je-li hodnota uvedeného součtu kladná, může být hodnocená investice přijata. Je-li naopak záporná, jde o důležitý argument pro nepřijetí hodnocené investice.

Při porovnávání více investičních příležitostí mezi sebou za účelem výběru té z nich, která se jeví jako nejvýhodnější, se zpravidla vybírá ta, která vykazuje nejvyšší čistou současnou hodnotu (NPV).

$$NPV = \sum_{t=0}^n \frac{CF_t}{(1+r)^t}$$

kde	NPV	čistá současná hodnota
	CF_t	peněžní toky v jednotlivých letech
	n	doba životnosti projektu
	r	diskontní úroková míra

Výhodou této metody je, že jí lze popsat libovolné peněžní toky, a také fakt, že výsledkem je absolutní hodnota přínosu investice v dnešních cenách (lze ji sčítat). Výsledná hodnota udává, kolik peněz realizace investice přinese. V případě srovnání více investičních alternativ, je preferována vyšší NPV.

10.2.2. Diskontní míra

Výnosové oceňování představuje jednu z fundamentálních metod hodnocení investic. Tento čistě ekonomický pohled vyjadřuje užitek, který je investice schopna investorovi v budoucnu přinést. Principem výnosové metody oceňování investicí je sumarizace budoucích čistých zisků převedených (diskontovaných) na současnou hodnotu. Na vývoj výnosů ovšem působí mnoho faktorů, které lze jen obtížně předvídat. Míru nejistoty vyjádření současné hodnoty pomocí budoucích (nejistých) příjmů vyjadřuje diskontní míra.

Vztah pro výnosovou hodnotu je obecně vyjádřen rovnicí:

$$PV = \frac{FV}{q^n}$$

PV ... Současná hodnota (Present value)

FV ... Budoucí hodnota (Future value)

$\frac{1}{q_n}$... Diskontní míra

Diskontní míra je trhem určená požadovaná míra návratnosti, odvozená jako riziko asociované s určitým stupněm bezpečnosti investice. Diskontní míra vyjadřuje rovnováhu na trhu s danou investicí charakterizovanou jistými výnosy a mírou rizika.

Diskontní míru budu uvažovat na úrovni 4%.

10.2.3. Ceny materiálu

Pro výpočet investičních nákladů je třeba znát ceny použitého materiálu. Jsou použity ceny zjištěné z internetových stránek výrobců [10], [11] platné k 1. 4. 2014.

Typ kabelu	Cena/km (Kč)
1-CYKY 4x50mm ²	432612
1-CYKY 4x70mm ²	594952,8
1-CYKY 4x95mm ²	797768,8
1-CYKY 4x120mm ²	1004984,8
1-CYKY 4x150mm ²	1247116
1-CYKY 4x185mm ²	1542892,4
1-CYKY 4x240mm ²	2008889,6
1-AYKY 4x95mm ²	170544
1-AYKY 4x150mm ²	251940
1-AYKY 4x185mm ²	307282
1-AYKY 4x240mm ²	386018

Tab. 18: Ceny použitých kabelů [11]

Typ	Popis	Cena/ks (Kč)
FH1-3L/F	Řadový pojistkový odpínač	3197
FH2-3L/F	Řadový pojistkový odpínač	4027
FH3-3L/F	Řadový pojistkový odpínač	5547
PNA1 125A gG	Pojistková vložka	88
PNA1 160A gG	Pojistková vložka	88
PNA2 250A gG	Pojistková vložka	140
PNA2 315A gG	Pojistková vložka	164
PNA3 630A gG	Pojistková vložka	328
BC160NT305-63D	Jistič	3542
BC160NT305-80D	Jistič	3542
BC160NT305-100D	Jistič	3771
BD250NE305	Spínací blok	3315
SE-BD-0100-DTV3	Nadproudová spoušť	2896
SE-BD-0160-DTV3	Nadproudová spoušť	3114
SE-BD-0250-DTV3	Nadproudová spoušť	4670

Tab. 19: Ceny použitých ochran [10]

10.2.4. Náklady pro jednotlivé varianty

Délky kabelů v jednotlivých variantách jsou uvedeny v kapitole 7.1, použité ochrany v kapitole 9. Ceny v Tab. 18 a Tab. 19..

Varianta	Investiční náklady (Miliony Kč)	
	Okamžité	Po 5ti letech
1	14,87	-
2	4,45	-
3	10,67	4,34
4	4,86	-
5	1,60	-
6	3,39	1,47

Tab. 20: Investiční náklady pro jednotlivé varianty

10.2.5. Výpočet ztrát

Ztrátový výkon

Průchodem proudu vodičem vznikají činné ztráty, pro které platí:

$$\Delta P_{m-i} = 3 \cdot R_i \cdot I_{m-i}^2$$

kde ΔP_{m-i} ztráty ve vedení k i-tému odb. místu při maximálním zatížení (kW)

R_i odpor vedení k i-tému odběrnému místu (Ω)

I_{m-i} proud ve vedení k i-tého odb. místu při odběru max. výkonu (A)

Roční ztráty ve vedení

Doba využití maxima – je to čas, za který bychom při odebíraném P_{\max} odebrali energii jako při časově proměnném odběru v daném období:

$$\tau_{m-i} = \frac{W_i}{P_{m-i}} (h)$$

kde τ_{m-i} doba využití maxima u i-tého odběrného místa (h)

W_i předpokládaná roční spotřeba i-tého odběrného místa (kWh)

P_{m-i} maximální výkon i-tého odběrného místa (kW)

Pro zjednodušení budu uvažovat, že doba plných ztrát je stejná jako doba využití maxima.

$$\tau_{m-i} = \tau_{pz-i}$$

kde τ_{pz-i} doba plných ztrát u i-tého odběrného místa (h)

Ztráty

$$\Delta W_i = \tau_{pz-i} \cdot \Delta P_{m-i} \text{ (kWh)}$$

kde ΔW_i energie potřebná k pokrytí ročních ztrát ve vedení (kWh)

Příklad výpočtu (pro odběr A v roce 2015, NT)

Ztráty při maximálním zatížení

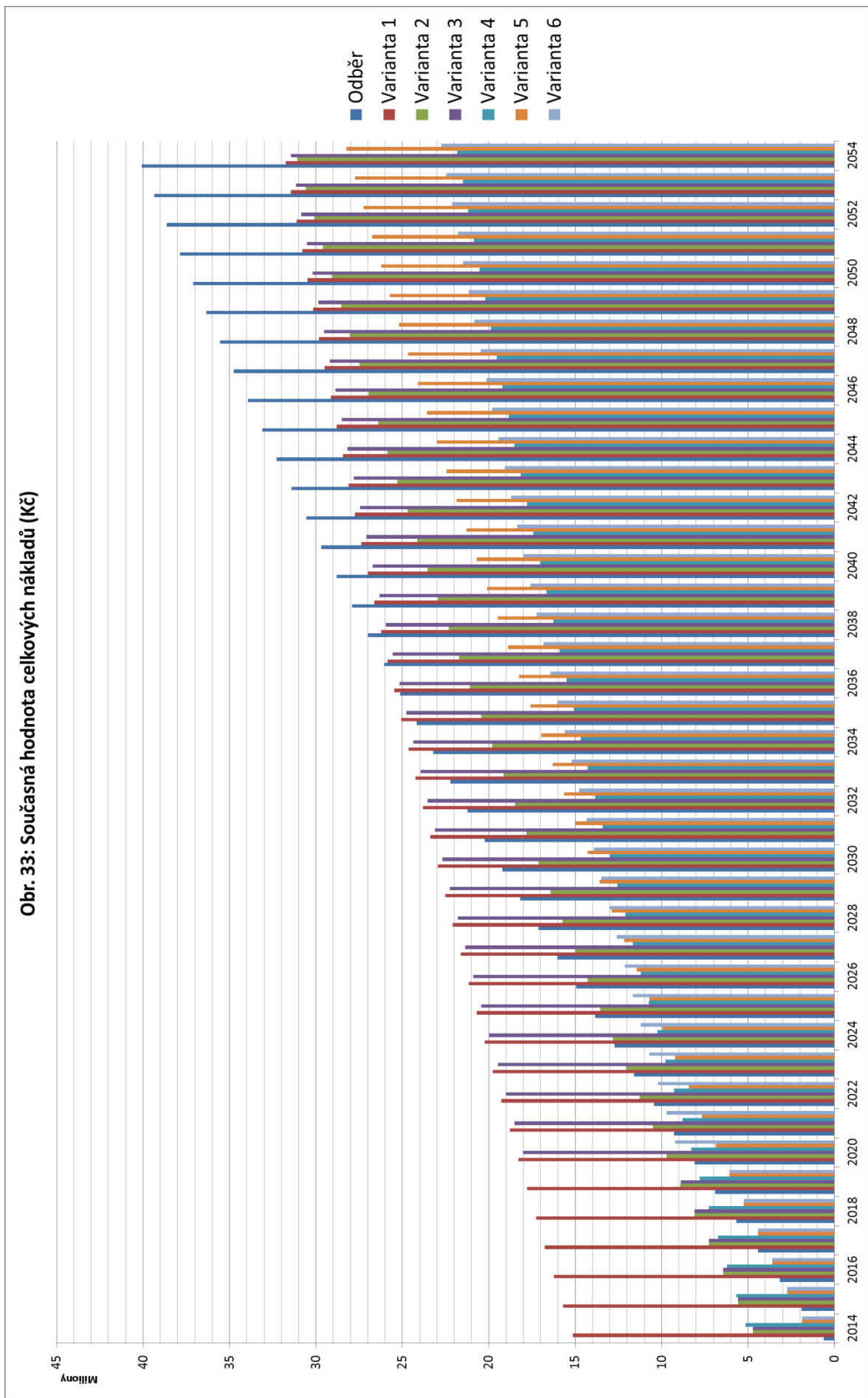
$$\Delta P_{m-i} = 3 \cdot R_i \cdot I_{m-i}^2 = 3 \cdot 0,161 \cdot 50^2 = 1211 \text{ W}$$

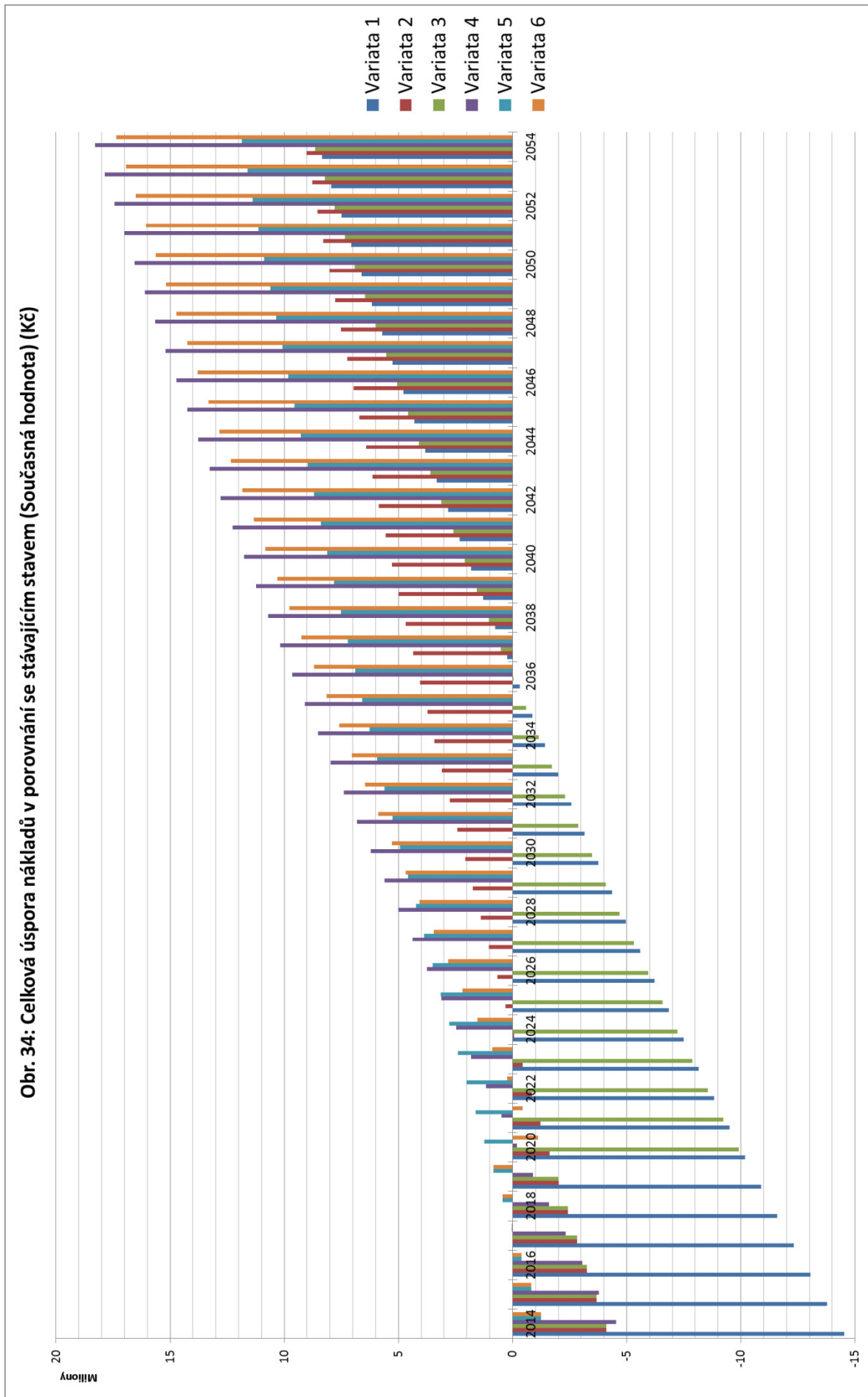
Doba plných ztrát

$$\tau_{pz-A} = \frac{W_A}{P_{m-i}} = \frac{8223}{32,91} = 250 \text{ hodin}$$

Roční ztráty při předpokládaném zatížení

$$\Delta W_A = t_{mA} \cdot \Delta P_{mA} = 250 \cdot 1,211 = 302,48 \text{ kWh}$$





Závěr

Cílem této diplomové práce byl návrh variantního řešení sítě a následné zhodnocení variant.

V úvodu práce jsou uvedeny teoretické poznatky k elektrickým sítím. Jsou zde shrnuty druhy sítí z hlediska zapojení, rozdělení sítí podle jejich uložení, podmínky připojení a provozování distribučních sítí a hlediska návrhu elektrického vedení.

V další části se nachází teoretický rozbor a zásady pro výpočet zkratových poměrů. Při respektování těchto zásad se lze dopočítat výsledků přijatelné přesnosti. Výpočet zkratových poměrů je nezbytný pro správné nastavení ochran na rozvodně. Z hlediska nastavení ochran na nejmenší možný zkratový proud musíme znát minimální jednofázový zkratový proud. Pro kontrolu zařízení na oteplení zase maximální trojfázový rázový zkratový proud.

Teoretická část je zakončena stručným úvodem do multikriteriální analýzy, ve kterém je popsán obecný postup vícekritériálního hodnocení variant a nejpoužívanější metody MC analýzy.

V praktické části je vlastní návrh distribuční kabelové sítě, která by měla nahradit stávající připojení k síti distribuční společnosti. Jednotlivé varianty řešení sítě jsou navrženy nejprve s ohledem na maximální dovolený úbytek napětí. Následně jsou vypočítány pro jednotlivé varianty zkratové proudy a navrženo jištění. V další části je ověření odolnosti sítě na účinky zkratových proudů. V závěru praktické části je potom odhad budoucí spotřeby elektrické energie a výpočet nákladů pro všechny varianty řešení.

Realizace kterékoliv varianty by znamenala v průběhu životnosti sítě úsporu finančních prostředků v řádu několika milionů korun.

Z dlouhodobého hlediska se jako nejvýhodnější jeví varianta číslo 4, u které předpokládána úspora představuje asi 18,3 mil. korun. Hned za ní následuje varianta číslo 6, u které je úspora o 1 milion nižší – tj. 17,3 mil. U 5. varianty by úspora představovala necelých 12 mil. korun.

Za méně vhodné považují varianty číslo 1, 2 a 3, u kterých se úspora pohybuje na přibližně stejné úrovni 8 - 9 mil. korun. Z těchto variant považují za vyloženě nevhodné varianty 1 a 3, které i přes to že náklady na jejich realizaci jsou přibližně trojnásobné než u varianty 2, vykazují předpokládanou míru úspory dokonce mírně nižší než toto řešení.

Nejkratší doba návratnosti je u varianty číslo 5, tato doba vychází na 4 roky. U variant 4 a 6 je předpokládaná doba návratnosti asi 9 let a u varianty 2 12 let. Nejpozději se vložená investice vrátí u variant číslo 1 a 3, kde přesahuje polovinu předpokládané životnosti sítě – tj. 20 let. To je způsobeno vysokými náklady na stavbu těchto variant.

Celkově vychází varianty navržené z hliníku (4, 5 a 6) mnohem lépe než varianty navržené z mědi. To je způsobeno především vysokou pořizovací cenou měděných kabelů, která je několikanásobně vyšší než u kabelů vyrobených z hliníku.

Literatura

- [1] TOMAN, Petr, Jiří DRÁPELA, Stanislav MIŠÁK, Jaroslava ORSÁGOVÁ, Martin PAAR a David TOPOLÁNEK. Provoz distribučních soustav. Vyd. 1. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011, 263 s. ISBN 978-80-01-04935-8.
- [2] HRADÍLEK, Zdeněk. *Elektroenergetika*. 1. vyd. Ostrava: Vysoká škola báňská, 1992, 164 s. ISBN 80-707-8132-7.
- [3] KREJČÍ, Petr. *Cvičení z elektroenergetiky*. 1. vyd. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2003, 106 s. ISBN 80-248-0471-9.
- [4] MEDVEC, Zdeněk. *Přechodové jevy v elektrizačních soustavách: návody do cvičení*. 1. vyd. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, Fakulta elektrotechniky a informatiky, 2001, 73 s. ISBN 80-707-8856-9.
- [5] PAUZA, Josef. *Zkratky v elektrických rozvodech*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1970, 246 s.
- [6] ČSN EN 60909-0. *Zkratové proudy v trojfázových střídavých soustavách: Část 0: Výpočet proudů*. Praha: Český normalizační institut, 2002. Třídící znak 33 3022.
- [7] ČSN 33 2000-5-51 ed.2. *Elektrická instalace budov: Část 5-51: Výběr a stavba elektrických zařízení - Všeobecné předpisy*. Praha: Český normalizační institut, 2006.
- [8] ČSN 33 2000-4-41 ed. 2. *Elektrické instalace nízkého napětí: Část 4-41: Ochranná opatření pro zajištění bezpečnosti – Ochrana před úrazem elektrickým proudem*. Praha: Český normalizační institut, 2007.
- [9] ČEZ Distribuce, a. s.: *Pravidla provozování DS* [online]. [cit. 2013-12-28]. Dostupné z: <http://www.cezdistribuce.cz/>
- [10] OEZ s.r.o. [online]. [cit. 2014-04-27]. Dostupné z: <http://www.oez.cz/>
- [11] NKT CABLES. [online]. [cit. 2014-04-01]. Dostupné z: <http://www.nktcables.com/cz/>
- [12] BERÁNEK, Eduard. Výpočet zkratových proudů ve trojfázových střídavých soustavách dle ČSN EN 60909. Ostrava, 2011. Bakalářská práce. VŠB - Technická univerzita Ostrava Fakulta elektrotechniky a informatiky.
- [13] ČSN ISO 690. Informace a dokumentace – Pravidla pro bibliografické odkazy a citace informačních zdrojů. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011. Třídící znak 01 0197.

Seznam obrázků

Obr. 1:	Struktura elektrizační soustavy	13
Obr. 2:	Paprsková síť	17
Obr. 3:	Okružní síť	18
Obr. 4:	Zjednodušená mřížová síť	18
Obr. 5:	Klasická mřížová síť	19
Obr. 6:	Jednosystémová mřížová síť	20
Obr. 7:	Jednosystémová mřížová síť s prostřídánými napaječi	20
Obr. 8:	Dvousystémová mřížová síť	20
Obr. 9:	Časový průběh zkratového proudu	30
Obr. 10:	Rázová složka zkratového proudu	31
Obr. 11:	Přechodná složka zkratového proudu	31
Obr. 12:	Ustálená složka zkratového proudu	31
Obr. 13:	Stejnoseměrná složka zkratového proudu	31
Obr. 14:	Sousledná složka zkratové impedance $Z_{(1)}$	34
Obr. 15:	Zpětná složka zkratové impedance $Z_{(2)}$	34
Obr. 16:	Netočivá složka zkratové impedance $Z_{(0)}$	34
Obr. 17:	Obecný postup vícekritériálního hodnocení variant	41
Obr. 18:	Kabelová trasa	44
Obr. 19:	Kabel 1-CYKY	45
Obr. 20:	Kabel 1-AYKY	45
Obr. 21:	Schéma celé sítě	59
Obr. 22:	Schéma společných prvků	65
Obr. 23:	Náhradní schéma	65
Obr. 24:	Ampérsekundová charakteristika jističe, pojistky a dov. zatížení vedení	78
Obr. 25:	Schéma sítě pro variantu 1	79
Obr. 26:	Schéma sítě pro variantu 2	80
Obr. 27:	Schéma sítě pro variantu 3	81
Obr. 28:	Schéma sítě pro variantu 4	82
Obr. 29:	Schéma sítě pro variantu 5	83
Obr. 30:	Součinitel m pro tepelný účinek stejnosměrné složky zkratového proudu	85
Obr. 31:	Součinitel m pro tepelný účinek střídavé složky zkratového proudu	85
Obr. 32:	Předpokládaný vývoj spotřeby elektrické energie	88
Obr. 33:	Celková úspora nákladů v porovnání se stávajícím stavem	93
Obr. 34:	Současná hodnota celkových nákladů	94

Seznam tabulek

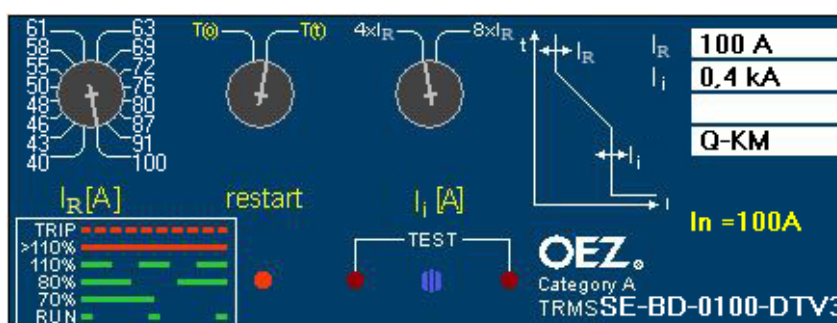
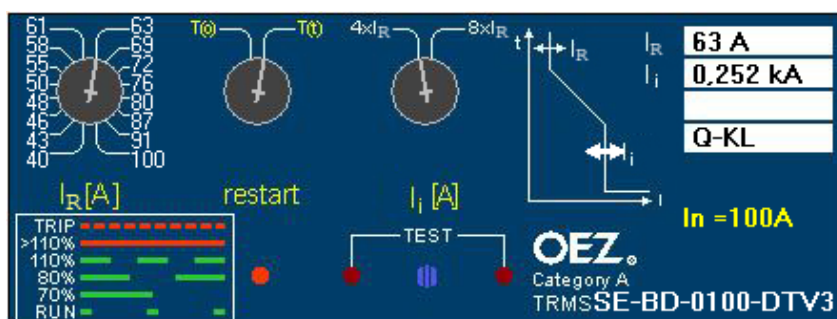
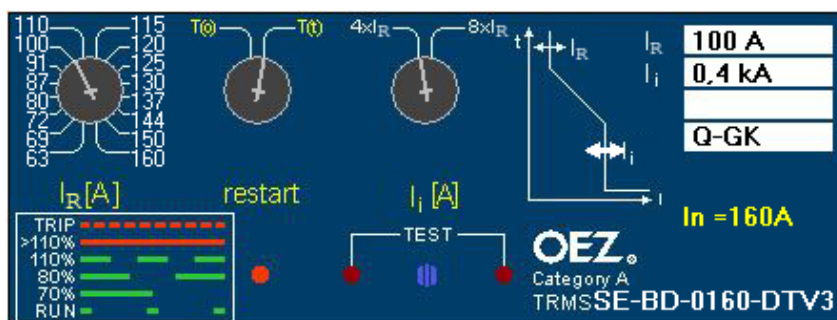
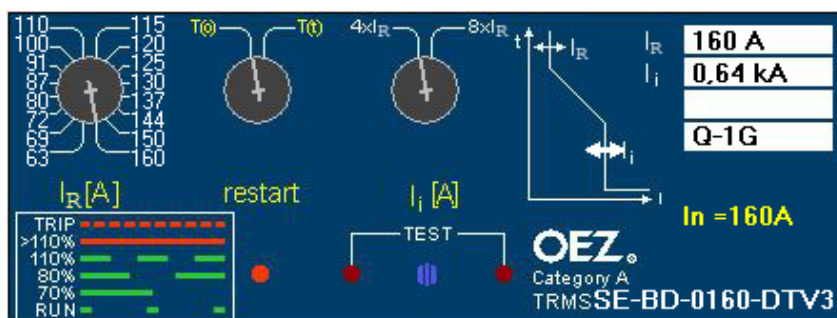
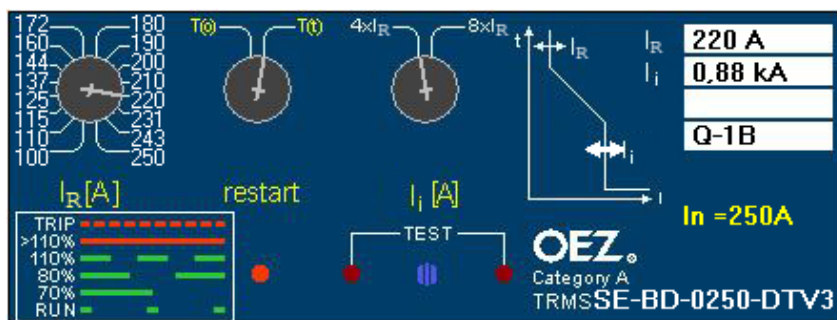
Tab. 1:	Napěťový součinitel c	35
Tab. 2:	Přehled průřezů a úbytků pro 1. Variantu	50
Tab. 3:	Přehled průřezů a úbytků pro 2. Variantu	51
Tab. 4:	Přehled průřezů a úbytků pro 3. Variantu	53
Tab. 5:	Přehled průřezů a úbytků pro varianty 4, 5 a 6	57
Tab. 6:	Parametry použitých kabelů	58
Tab. 7:	Maximální zkratové proudy	64
Tab. 8:	Parametry použitých kabelů pro výpočet minimálních zkratových proudů	65
Tab. 9:	Parametry vedení pro výpočet minimálních zkratových proudů	69
Tab. 10:	Jednofázový počáteční zkratový proud (minimální)	77
Tab. 11:	Přehled ochran navrhnutých pro variantu 1	79
Tab. 12:	Přehled ochran navrhnutých pro variantu 2	80
Tab. 13:	Přehled ochran navrhnutých pro variantu 3	81
Tab. 14:	Přehled ochran navrhnutých pro variantu 4	82
Tab. 15:	Přehled ochran navrhnutých pro variantu 5	83
Tab. 16:	Koeficient K pro dimenzování vedení podle tep. účinků zkratového proudu	86
Tab. 17:	Předpokládaný vývoj spotřeby elektrické energie	87
Tab. 18:	Ceny použitých kabelů	90
Tab. 19:	Ceny použitých ochran	90
Tab. 20:	Investiční náklady pro jednotlivé varianty	91

Seznam příloh

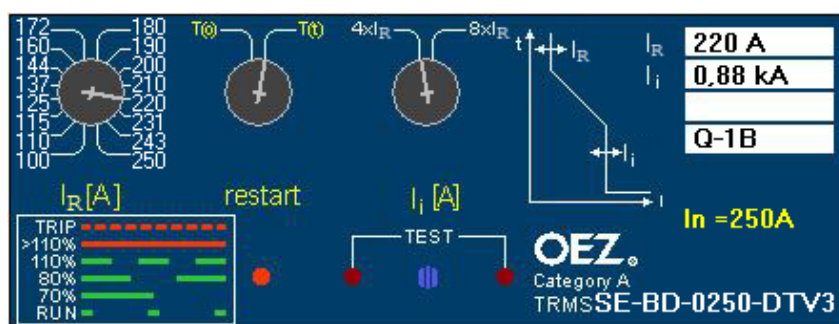
Příloha A: Nastavení nadproudových spouští u jističů řady BD250

Příloha A: Nastavení nadproudových spouští u jističů řady BD250

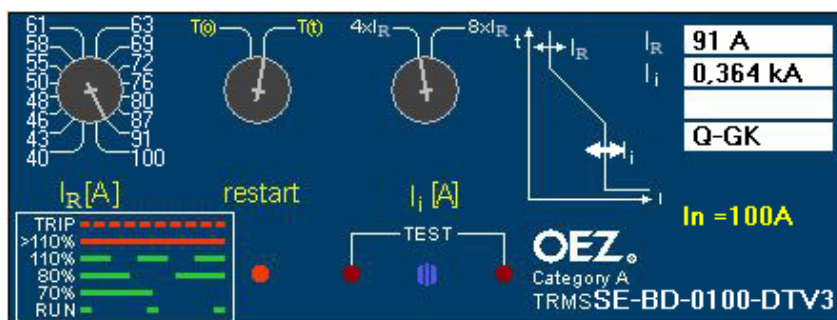
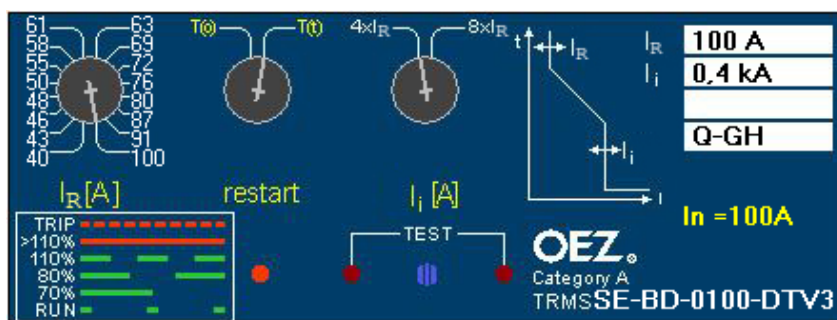
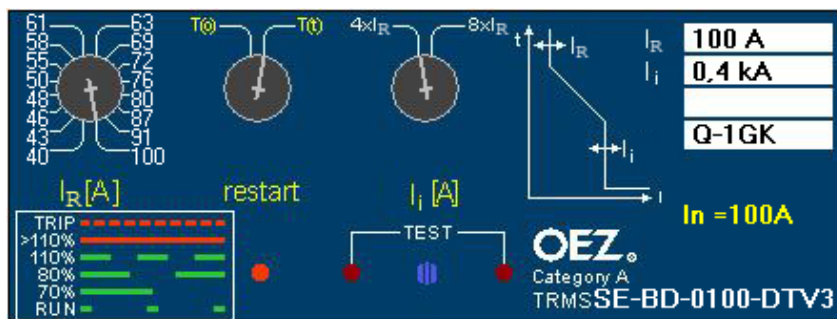
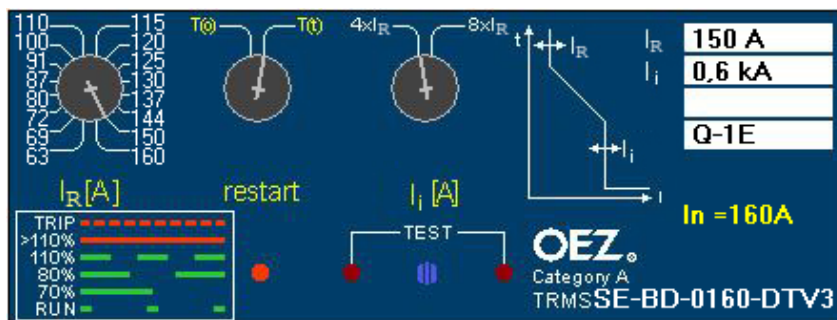
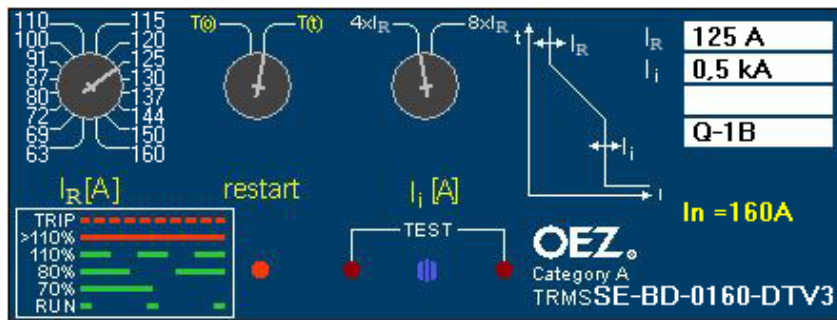
Varianta 1 (Varianta 3)

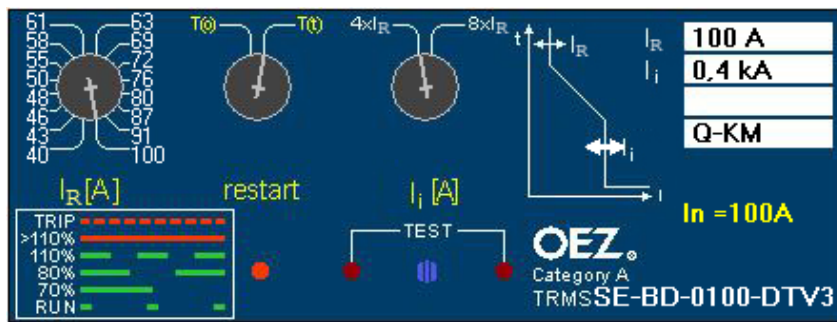
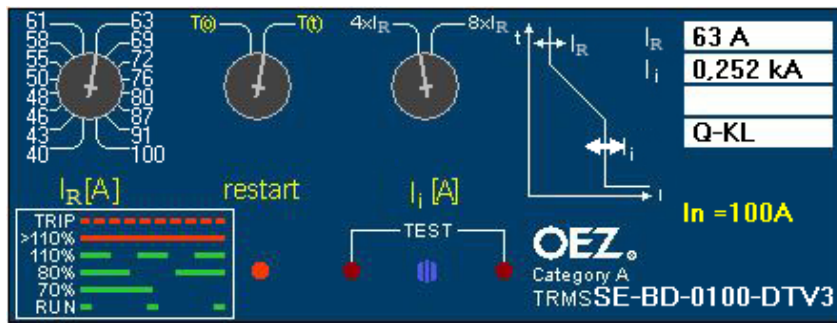


Varianta 2



Varianta 4 (Varianta 6)





Varianta 5

